

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГОУ ВПО МОРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ
АДМИРАЛА Ф.Ф. УШАКОВА**

Старжинская Наталья Викторовна

*(к.т.н., доцент кафедры «Радиосвязь на морском флоте»,
Морская Государственная академия им. Ф.Ф. Ушакова)*

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ
И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
К ИНФОРМАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ**

На конкурс «Молодые ученые транспортной отрасли – 2010»

Новороссийск
2010

Содержание

1. Общая характеристика представленных работ	4
2. Обоснование концепции применимости классической теории надежности к оценке надежности информационных систем.....	9
3. Интерполирование интенсивностей постепенных отказов в марковской модели эксплуатационного процесса / А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец. Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 6. Новороссийск. РИО НГМА. 2001.	43
4. Информационный подход к анализу качества и эффективности морских систем / Н.В. Карбовец. Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 7. Новороссийск. РИО НГМА. 2002.....	49
5. О надежности человека-оператора в технологии регулирования ЭМО порта. / А.П. Лицкевич, О.И. Андрианов, Н.В. Карбовец. Сборник материалов Международной научной конференции «Компьютерное моделирование и информационные технологии в науке, инженерии и образовании», Пенза. РИО ПГСХА. 2003.	60
6. Оценка вероятности безотказной работы системы регулирования ЭМО в порту с учетом надежности человека-оператора / А.П. Лицкевич, О.И. Андрианов, Н.В. Карбовец. Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 8. Новороссийск. РИО НГМА. 2003.	64
7. Прогнозирование вероятности возникновения критической ситуации в эргатической системе на примере швартуемого судна / Н.В. Карбовец, В.В. Демьянов. Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 9. Новороссийск. РИО НГМА. 2004.	71
8. Некоторые аспекты вероятностного анализа деятельности операторов береговых систем управления движением судов / Н.В. Карбовец, О.И. Андрианов. Известия высших учебных заведений (Северо-Кавказский регион) «Проблемы водного транспорта». Ч.1. Ростов-на-Дону. РГУ. 2004.....	78
9. Управляемость сложных морских радиоэлектронных систем в условиях неопределенности данных / А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец. Сборник научных трудов. Выпуск 11. – Новороссийск: РИО МГА, 2006.....	85
10. Интеллектуальное дополнение человеческого элемента эргатической системы швартовки судна / В.В. Демьянов, А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец. Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. Спец. выпуск. Проблемы водного транспорта, Ч.1. – Ростов-на Дону. РГУ, 2006.....	97

11. Определение вероятностных характеристик морской эрготехнической системы управления швартовкой судов с учетом временного фактора / Н.В. Карбовец, Н.Ю. Росторгуева, В.В. Демьянов. Сборник научных трудов. Выпуск 11. – Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2006..... 113
12. Обеспечение эксплуатационной надежности адаптирующейся системы радиолокационных датчиков ближнего действия для повышения безопасности мореплавания / Н.В. Старжинская, С.А. Лицкевич. Материалы седьмой региональной научно-технической конференции: Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Ч.2 – Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2008. 120
13. Роль резерва времени на принятие решения судоводителем при прохождении узкостей и проливов / Н.В. Старжинская, Д.С. Авдонькин. Сборник научных трудов. Выпуск 13. – Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2009..... 128
14. Многопараметрическое распознавание технического состояния сложных береговых систем / Н.В. Старжинская, С.А. Лицкевич. Материалы восьмой региональной научно-технической конференции: Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Ч.2 – Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2010. 134
15. Системная надежность морского радиоэлектронного оборудования / А.П. Лицкевич, Бойко А.И., Н.В. Карбовец, В.В. Демьянов. Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова. 2008..... 141
16. Прикладные вопросы надежности информационных систем/ Н.В. Старжинская. Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова. 2010. 142

1. Общая характеристика представленных работ

Надежность и безопасность захода судна в порт в значительной степени обеспечивается широким применением морских технических систем. Эффективное функционирование таких систем может быть обеспечено лишь в случае их высокой надежности и точности. При этом проблема надежности морских технических систем связана не только с технико-экономическим аспектом, но и, в гораздо большей мере, с обеспечением безопасности жизни людей.

Одним из эффективных методов повышения надежности в процессе эксплуатации системы является прогнозирование ее технического состояния (в частности отказов) и выработка, на основе полученной информации, решений о периоде технического обслуживания объектов и профилактической регулировке их параметров. Поскольку сложная система характеризуется большим числом параметров, то среди них по заранее выбранным критериям выбирают наиболее значимый, называемый определяющим параметром, степень изменения которого и определяет периодичность проведения профилактических работ. Вопросы прогнозирования технического состояния и учета постепенных отказов в эксплуатационном процессе более подробно рассмотрены в работе «Интерполирование интенсивностей постепенных отказов в марковской модели эксплуатационного процесса /А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец» (Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 6. Новороссийск. РИО НГМА. 2001).

С целью повышения надежности морских технических систем управления швартовкой необходимо в первую очередь совершенствовать те звенья системы, где наблюдаются наибольшие отклонения от нормальных условий функционирования. Одним из основных звеньев сложной морской системы является человек-оператор. В соответствии с этим, при рассмотрении вопроса об обеспечении работоспособности таких систем, их необходимо рассматривать в комплексе с человеком-оператором и как ее составляющую часть. Более подробно вопрос обеспечения надежности человека-оператора в сложных морских системах рассмотрен в статьях: «О надежности человека-оператора в технологии регулирования ЭМО порта/А.П. Лицкевич, О.И. Андрианов, Н.В. Карбовец»

(Сборник материалов Международной научной конференции «Компьютерное моделирование и информационные технологии в науке, инженерии и образовании», Пенза. РИО ПГСХА. 2003); "Оценка вероятности безотказной работы системы регулирования ЭМО в порту с учетом надежности человека-оператора"(Сб. научных трудов НГМА, выпуск 8, 2003г.); «Интеллектуальное дополнение человеческого элемента эргатической системы швартовки судна / В.В. Демьянов, А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец» (Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. Спец. выпуск. Проблемы водного транспорта, Ч.1. – Ростов-на Дону. РГУ, 2006).

Надежность и работоспособность сложных морских систем, определяемая, как уже отмечалось выше, в значительной степени надежностью оператора и его психофизиологическими особенностями, определяется также зависящими от этих особенностей своевременных, безошибочных и правильных действий оператора в критической ситуации. Оценка надежности эргатических систем с учетом своевременных, безошибочных и правильных действий оператора показана в работах: «Некоторые аспекты вероятностного анализа деятельности операторов береговых систем управления движением судов/ Н.В. Карбовец, О.И. Андрианов» (Известия высших учебных заведений (Северо-Кавказский регион) «Проблемы водного транспорта». Ч.1. Ростов-на-Дону. РГУ. 2004); «Определение вероятностных характеристик морской эрготехнической системы управления швартовкой судов с учетом временного фактора / Н.В. Карбовец, Н.Ю. Росторгуева, В.В. Демьянов» (Сборник научных трудов. Выпуск 11. – Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2006); «Роль резерва времени на принятие решения судоводителем при прохождении узкостей и проливов / Н.В. Старжинская, Д.С. Авдонькин» (Сборник научных трудов. Выпуск 13. – Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2009).

Из-за наличия неопределенности в состояниях сложных систем, а также плохоорганизованности некоторых из них, для оценки надежности и прогнозирования их будущих состояний целесообразно использовать, например логико-вероятностные методы анализа надежности и безопасности сложных систем, а

также составления деревьев отказов и событий. Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе «Прогнозирование вероятности возникновения критической ситуации в эргатической системе на примере швартуемого судна / Н.В. Карбовец, В.В. Демьянов» (Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 9. Новороссийск. РИО НГМА. 2004).

Современная наука располагает мощными средствами и теориями, помогающими анализировать сложные системы управления, обеспечивать их безаварийную эксплуатацию, в частности на морском флоте. К таким средствам, в первую очередь, относятся теория оптимальных статистических решений, теория дуального управления, теория инвариантности, закон необходимого разнообразия Эшби, принцип внешнего дополнения и некоторые другие. Однако существуют сложные подвижные системы и комплексы, к которым эти средства применяются с большими ограничениями или совсем не могут быть применены. Это, в первую очередь, касается сбора и анализа данных об аварийных ситуациях и катастрофических явлениях. В этих случаях мы имеем дело с очень ограниченными данными, чтобы воспользоваться всей мощностью современного математического анализа. Возможность анализа формализованными методами морских объектов, информация о которых, неполна, и содержит в себе индетерминированные компоненты обсуждается в статье «Управляемость сложных морских радиоэлектронных систем в условиях неопределенности данных / А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец» (Сборник научных трудов. Выпуск 11. – Новороссийск: РИО МГА, 2006).

Особый интерес для оценки аппаратурной надежности морских технических систем представляют параметрические отказы, поскольку в процессе функционирования, особенно в морских условиях, аппаратура изнашивается, а также подвергается значительным дестабилизирующим внешним воздействиям, вследствие чего параметры системы могут изменяться и выходить за допустимые пределы. Достигнув критического уровня, накопленные в результате эксплуатации повреждения приводят к отказу системы. Одним из наиболее эффективных методов повышения эксплуатационной надежности является про-

гнозирование технического состояния системы, по результатам которого проводится корректировка ее параметров и замена устройств, выработавших свой ресурс. Метод обеспечения надежности информационной системы прогнозированием обобщенным параметром рассмотрен в статье «Обеспечение эксплуатационной надежности адаптирующейся системы радиолокационных датчиков ближнего действия для повышения безопасности мореплавания / Н.В. Старжинская, С.А. Лицкевич» (Материалы седьмой региональной научно-технической конференции: Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Ч.2 – Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2008). Метод повышения эксплуатационной надежности путем диагностики технического состояния системы с помощью математической модели многопараметрического распознавания образов рассмотрен в статье «Многопараметрическое распознавание технического состояния сложных береговых систем / Н.В. Старжинская, С.А. Лицкевич» (Материалы восьмой региональной научно-технической конференции: Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Ч.2 – Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2010).

В то же время наряду с аппаратурными отказами имеют место и, так называемые, информационные отказы, связанные с нарушением передачи информации. В этом случае аппаратура информационной системы исправна, но параметры сигналов выходят за допустимые пределы. Частота возникновения таких отказов сравнима с аппаратурными отказами. В связи с этим для надежной работы информационной системы необходимо обеспечить надежность нахождения параметров сигналов в допустимых пределах, поскольку для таких систем недопустимы отказы на уровне сигналов, также как и отказы оборудования. В результате необходимо также как и для технических систем, изучение изменения параметров сигналов во времени и введение для них понятия надежности.

В представленной работе «Обоснование концепции применимости классической теории надежности к оценке надежности информационных систем» приведены модели и примеры оценки надежности морских технических систем, а

также приводится обоснование концепции применимости моделей аппаратной надежности к оценке изменений параметров сигналов (информационной надежности). Сущность представленных научно-технических решений состоит в том, что при оценке надежности информационных систем необходимо учитывать то, что надежность информационной системы представляет собой комплексное понятие, содержащее две составляющие – аппаратную и информационную надежность. При этом в ряде задач для оценки информационной надежности можно применить аппарат классической теории надежности технических систем, использующий теорию вероятностей, что значительно облегчает исследование информационной надежности, для которой, как правило, применяют теорию случайных процессов. Информационный подход к анализу надежности морских технических систем приводится также в работе «Информационный подход к анализу качества и эффективности морских систем / Н.В. Карбовец (Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 7. Новороссийск. РИО НГМА. 2002).

Реализация изложенных в работе научных решений позволит существенно повысить эффективность применения математических методов в исследовании надежности сложных информационных систем.

2. Обоснование концепции применимости классической теории надежности к оценке надежности информационных систем

2.1. Основные понятия и концептуальные положения

Надежность и безопасность захода судна в порт в значительной степени обеспечивается широким применением морских информационных и радиоэлектронных систем. Эффективное функционирование таких систем может быть обеспечено лишь в случае их высокой надежности и точности. При этом проблема надежности информационных систем связана не только с технико-экономическим аспектом, но и, в гораздо большей мере, с обеспечением безопасности жизни людей. Поэтому обеспечение надежности морских информационных и радиоэлектронных систем – важнейшая научно-техническая задача.

Под термином "надежность" понимают свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, определяющих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях рабочего и резервного применения, технического обслуживания, ремонта, транспортирования и хранения. Решение проблем, связанных с обеспечением надежности, является резервом повышения эффективной работы технических систем [1, 2].

В решении задач надежности важнейшими являются:

- обеспечение высокой вероятности безотказной работы;
- поддержание высокой вероятности безотказной работы в течение длительного времени, т.к. оценивается изменение параметров в процессе эксплуатации объектов;
- прогнозирование работоспособности объекта с точки зрения допустимых границ изменения его выходных показателей.

В процессе эксплуатации морская радиоэлектронная аппаратура подвергается воздействию внешних дестабилизирующих факторов, которые при длительном их воздействии приводят к выходу рабочих характеристик за допус-

тимые границы и даже к повреждениям аппаратуры. Именно накопленные в процессе эксплуатации повреждения, достигнув определенной величины, приводят к нарушению работоспособного состояния аппаратуры, которое называется отказом.

Отказы, связанные с нарушением работоспособности аппаратурной части информационных и радиоэлектронных систем называются *аппаратурными* отказами. Причинами аппаратурных отказов могут быть ошибки или несовершенство конструкции, нарушения или несовершенства технологического процесса изготовления, нарушения правил эксплуатации и непредусмотренные внешние воздействия, а также выход параметров системы за предельно допустимые пределы.

Традиционно используемый на практике подход к оценке надежности информационных систем состоит лишь в оценке аппаратурных отказов, при которых обеспечение работоспособности оборудования возможно путем восстановления системы с помощью замены отказавших блоков, путем резервирования элементов системы, путем проведения технического обслуживания и т.д. Однако характерной особенностью информационных систем является возможность их отказа и при отсутствии дефектов в элементах. Отказы, которые вызывают недопустимые искажения передаваемой и принимаемой информации являются *информационными*. Причины возникновения информационных отказов очень разнообразны и зависят от специфики конкретной системы. К таким причинам можно отнести, например, проблемы при передаче и приеме сигналов, помехи, изменение параметров сигнала и т.п. То есть это некоторые аномальные события, которые сопровождают внутренние или внешние по отношению к информационной системе физические процессы. Такие события, в свою очередь, приводят к аномальным событиям в информационной системе (информационным сбоям, отказам), которые называются *информационными нарушениями* [3].

Как отмечено в книге Дмитриева С.П. и др. «Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем» [3], «важным свойством

информационного отказа является то, что после него система либо самовосстанавливается, либо для ее восстановления достаточно лишь коррекции ее внутренней информации и не требуется замены элементов». В этом случае необходимо к классической теории надежности сделать существенные дополнения, в частности необходимы данные о распределениях времени самовосстановления, которые для различных систем различны.

Понятие отказа в теории надежности является фундаментальным, и от того насколько верно установлены причины, приведшие к отказу технического устройства, в частности информационной системы, зависят дальнейшие действия по его устранению, мероприятия по повышению безотказности и улучшению методов эксплуатации. Основным признаком, определяющим различные виды отказов, служит характер и протекание процессов, приводящих к отказу.

В теории надежности выделяют следующие основные виды отказов аппаратуры [1]:

–*внезапные* отказы, возникающие в результате неблагоприятного сочетания случайных внешних факторов, превышающих возможности изделия к адаптации в их окружении;

–*постепенные* отказы, возникающие в результате протекания процессов деградации, старения, износа, ухудшающих начальные параметры системы;

–*сложные* отказы, в случае которых время возникновения отказа – случайная величина, не зависящая от состояния изделия, а скорость процесса потери работоспособности изделия зависит от его сопротивляемости. Например, при ударном воздействии на конструкцию могут возникнуть трещины, которые при дальнейшей эксплуатации могут привести к ее разрушению.

Дальнейшая классификация отказов связана с их последствиями. Их можно разделить на параметрические и отказы функционирования. Отказ *функционирования* приводит к тому, что система не может выполнять своих функций. *Параметрический* отказ приводит к выходу параметров устройства за допустимые пределы, установленные технической документацией.

Существуют и другие критерии для классификации отказов. Так, по воз-

возможности последующего использования объекта после возникновения отказа различают полные и частичные отказы, по наличию внешних проявлений отказа различают явные и скрытые отказы и т.д.

С моей точки зрения аналогичную классификацию можно провести и для информационных отказов. В частности, внешние факторы, воздействующие на сигналы, например атмосферные помехи, различные шумы и т.п. меняют параметры сигнала и могут привести к состоянию системы, эквивалентному внезапному отказу. Возможно и постепенное изменение параметров сигнала, например, при возникновении эффекта Доплера, когда частота сигнала меняется с изменением скорости объекта. Если это изменение частоты приводит к уходу частоты за пределы полосы пропускания входного тракта приемного устройства, то его следует отнести к постепенным отказам. При этом для оценки информационной надежности могут применяться те же характеристики, что и при анализе аппаратурной надежности, такие как вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказов и др.

Среди перечисленных видов отказов особый интерес, как для оценки аппаратурной, так и для оценки информационной надежности, представляют параметрические отказы, поскольку параметры аппаратуры также как и параметры передаваемых и принимаемых сигналов в процессе эксплуатации системы могут изменяться и выходить за допустимые пределы. Ниже приводится ряд аналитических задач оценки параметрической надежности информационных систем.

2.2. Математическая модель оценки параметрической надежности по определяющему параметру

Как уже отмечалось выше, в процессе эксплуатации информационных и радиоэлектронных систем неработоспособное состояние может наступить не только в результате внезапных отказов, но и в результате отклонения параметров элементов системы от номинальных (требуемых) значений под воздействием изменений окружающих условий и старения, износа элементов. Отказы, которые происходят из-за случайных изменений параметров системы во времени

называются постепенными или параметрическими отказами [1,4].

Особенность оценки надежности системы при постепенных отказах состоит в учете информации о предшествующем ее состоянии и возможности на основе этой информации строить экстраполяции на будущие времена [1]. Поскольку надежность при постепенных отказах связана с изменением параметров элементов и системы в целом, часто для таких отказов употребляется термин *параметрическая надежность*. Параметрическая надежность характеризует постепенный выход параметров (или одного, выбранного в качестве определяющего) из рабочей области (X_{\max}, X_{\min}) . Устройство функционирует нормально, если его определяющие параметры находятся в определенных допустимых пределах $X_{j \min} \leq X_j \leq X_{j \max}$, т.е. если погрешности (отклонения) характеристик в реальных условиях эксплуатации не превосходят некоторой допустимой величины – *допуска*.

Значения показателей параметрической надежности существенно зависят от вида связей между элементами и вида характеристик изменения параметров, которые носят нестационарный, случайный характер. При этом полагают, что рабочая область изменения параметров устройства или системы не случайна и не меняется в течение работы системы.

Параметрической надежностью, в общем случае, называют вероятность P того, что при работе в реальных условиях характеристики устройства не выходят за пределы поля допуска:

$$P = p\{X_{1 \min} \leq X_1 \leq X_{1 \max}, \dots, X_{j \min} \leq X_j \leq X_{j \max}, \dots, X_{m \min} \leq X_m \leq X_{m \max}\} \quad (1)$$

Задача анализа параметрической надежности устройства заключается в определении P при известных законах распределения параметров x_i или в расчете некоторых необходимых числовых характеристик вероятности P при заданных числовых характеристиках функций распределения параметров.

Для фиксированного момента времени t вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии, т.е. вероятность того, что определяющий параметр находится в заданных границах (X_{\min}, X_{\max}) определяется выражением:

$$P(t) = \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} f(X, t) dx, \quad (2)$$

где $f(X, t)$ – плотность распределения значений параметра $X(t)$ в момент времени t .

В большинстве случаев, имеющих для практики значение, рассматриваются основные технические параметры, характеризующие работоспособность системы и являющиеся его мерой качества, называемые *определяющими параметрами*. Как правило, определяющим параметром выбирается тот параметр, который более существенно влияет на надежность устройства. Изменение некоторого параметра X , выбранного в качестве основного (определяющего), предполагается линейным во времени, т.е.

$$X(t) = b \cdot t, \quad (3)$$

где b – скорость изменения параметра X ; t – время наблюдения за параметром.

Скорость изменения определяющего параметра b , как правило, зависит от большого числа контролируемых и неконтролируемых факторов и является случайной величиной. Наиболее типичный случай, и это подтверждается на практике, когда она подчинена нормальному закону распределения:

$$f(b) = \frac{1}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(b - b_{cp})^2}{2\sigma_b^2}\right), \quad (4)$$

где $f(b)$ – плотность вероятности случайной величины – скорости изменения определяющего параметра b ; b_{cp} – средняя скорость процесса изменения параметра; σ_b – среднеквадратическое отклонение величины b .

Существует также понятие предельно допустимого значения определяющего параметра X_{max} , которое определяет срок службы информационной или радиоэлектронной системы, характеризуемого определяющим параметром X и достигается с течением времени под влиянием факторов, связанных со старением, изнашиванием или разрегулированием (при этом система теряет работоспособность, т.е. происходит отказ). Поскольку внешние и внутренние факторы, влияющие на процесс ухудшения определяющего параметра, имеют случайный характер, то и характер изменения определяющего параметра во времени, а также время достижения им критического значения, тоже являются случайными. Поскольку под действием дестабилизирующих факторов или в процессе старения определяющий параметр может не только расти (например, чувстви-

тельность приемного устройства), но и уменьшаться (например, мощность передающего устройства), то допустимое значение определяющего параметра может определяться и его минимальным значением X_{min} [1,5].

Для анализа надежности системы при постепенных отказах, связанных со случайным процессом изменения определяющего параметра $X(t)$, как правило, вычисляют следующие показатели:

–вероятность нахождения объекта в работоспособном состоянии $P(t)=P\{X(t) < X_{max}\}$;

–показатели наработки до постепенного отказа – времени достижения определяющим параметром значения X_{max} : плотность распределения наработки до отказа $f(t)$, вероятность безотказной работы $P(t) = P\{T > t\}$, интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Срок службы $t = T$, при котором $X(t) = X_{max}$, т.е. момент времени, в который происходит отказ, является функцией случайного аргумента b , т.е.

$$T = \varphi(b) = \frac{X_{max}}{b}; \quad T_{cp} = \frac{X_{max}}{b_{cp}}. \quad (5)$$

Поскольку вероятность безотказной работы является функцией времени, то необходимо определить плотность распределения $f(t)$ по заданной плотности $f(b)$. Используя известную из курса теории вероятности [6] формулу:

$$f(t = T) = f(\Psi(t)) |\Psi'(t)|, \quad (6)$$

где $\Psi(t) = X_{max}/T$; $\Psi'(t) = -X_{max}/T^2$,

получим

$$f(T) = \frac{T_{cp}}{d\sqrt{2\pi}T^2} \exp\left(-\frac{(T_{cp} - T)^2}{2d^2T^2}\right), \quad (7)$$

где $d = \sigma / b_{cp}$.

Теперь, зная вероятность $f(T)$, можем определить вероятность отказа системы:

$$Q(T) = \int_0^T f(t) dt. \quad (8)$$

Вероятность безотказной работы соответственно:

$$P(T) = 1 - Q(T). \quad (9)$$

Вводя нормированную функцию Лапласа $F(u)$, получим [1]:

$$P(t) = 0,5 + F\left(\frac{X_{max} - b_{cp}T}{T\sigma_b}\right). \quad (10)$$

Эта формула выражает вероятность того, что определяющий параметр $X(t)$ при данном $t=T$ не выйдет за пределы допустимого максимального значения X_{max} , т.е.

$$P(T) = P(X \leq X_{max}) \quad (11)$$

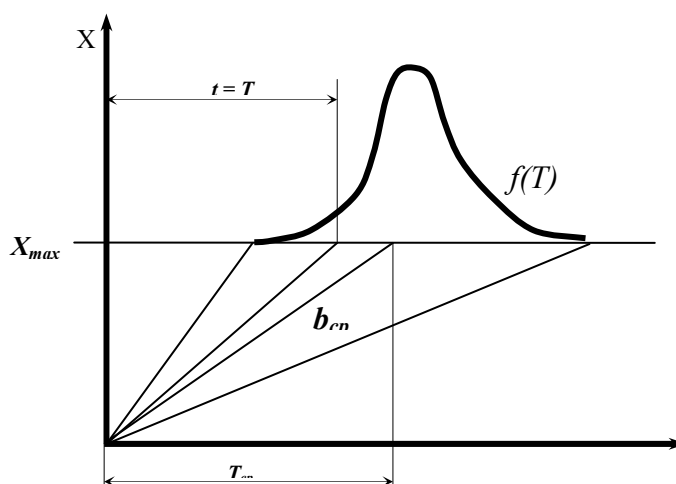


Рис.1. Плотность распределения наработки при постепенных отказах

Параметр $X(t)$ при заданном $t = T$, также как и скорость b , распределен по нормальному закону с параметрами:

$$M(X) = X_{cp} = b_{cp}T - \text{математическое ожидание}, \quad (12)$$

$$\sigma(X) = \sigma_b T - \text{среднеквадратическое отклонение}. \quad (13)$$

Поэтому вероятность безотказной работы численно равна площади, ограниченной кривой плотности распределения $f(X)$, заключенной в пределах от $-\infty$ до X_{max} :

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_{max}} \exp\left(-\frac{(x - x_{cp})^2}{2\sigma^2(x)}\right) dx = 0,5 + \left(F\left(\frac{x_{max} - b_{cp}T}{\sigma_b T}\right)\right) = \\ &= 0,5 + F\left(\frac{x_{max} - b_{cp}T}{\sigma_b T}\right). \end{aligned} \quad (14)$$

Этот закон носит название *альфа*-распределения и зависит от трех параметров. Более полная модель потери работоспособности устройства учитывает

и начальное рассеивание параметров устройства. В этом случае уравнение (3) должно быть записано в виде:

$$X(t) = X_0 + b \cdot t, \quad (15)$$

где X_0 – начальное значение параметра $X(t)$, которое также может быть случайной величиной и подчиняться некоторому закону распределения.

Начальный разброс параметров, обусловленный технологическими отклонениями, как правило, подчиняется нормальному закону распределения. В ряде случаев параметры x_i имеют законы распределения, отличающиеся от нормального закона. В частности, встречаются равномерный закон распределения (например, в узких пределах параметров для группы элементов, полученной в результате предварительной сортировки), распределение Рэля (для характеристик электронных ламп), распределение Вейбулла (для некоторых параметров полупроводниковых приборов) и т. п.

Дестабилизирующие факторы часто оказывают на элементы не только случайное, но и детерминированное воздействие, в результате которого номинальные значения параметров этих элементов изменяются в определенном направлении. Это относится, прежде всего, к воздействию явления старения и окружающей температуры. Если значение определяющего параметра уменьшается под действием этих дестабилизирующих факторов, например мощность излучения передающего устройства, то (15) принимает вид:

$$X(t) = X_0 - b \cdot t,$$

а отказ наступает при достижении определяющим параметром минимально допустимого значения X_{min} .

Срок службы в этом случае является функцией двух независимых случайных аргументов a и b :

$$T = \frac{X_{max} - X_0}{b}. \quad (16)$$

Если случайные аргументы X_0 и b распределены по нормальному закону, то и параметр X для каждого значения $t = T$ будет распределен по тому же закону с параметрами:

$$X_{cp} = X_{0\,cp} + b_{cp} \cdot T, \quad (17)$$

где X_{cp} – математическое ожидание величины X ;

$X_{0\,cp}, b_{cp}$ – средние значения случайных величин X_0 и b , а:

$\sigma_X = \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + \sigma_b^2 T}$ – среднеквадратическое отклонение величины X .

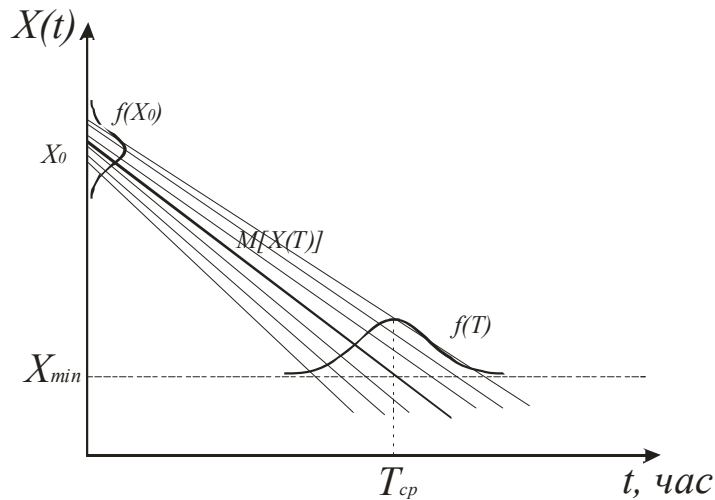


Рис. 2. Модель постепенного отказа с учетом рассеивания начального значения определяющего параметра

Упомянутое выше *альфа*-распределение используется для построения моделей разрегулирования объектов, при этом плотность распределения наработки до отказа представляется в виде:

$$f(T) = \frac{C\beta}{T^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{T} - \alpha\right)^2\right]. \quad (18)$$

где $\beta = |X_{\max} - X_0| / \sigma_b$ – относительный запас долговечности, имеет размерность времени;

$\alpha = \frac{b_{cp}}{\sigma_b}$ – относительная скорость изменения параметра, безразмерный

параметр;

$C = \frac{1}{F(u_2) - F(u_1)}$ – нормирующий множитель для усеченного нормального

распределения, где $U_1 = (\beta^{(1)} - b_{cp}) / \sigma_b$, $U_2 = (\beta^{(2)} - b_{cp}) / \sigma_b$.

Функция надежности при двух границах параметра в форме плотности распределения:

$$P(t) = F(Z_1) + F(Z_2),$$

где
$$Z_1 = \alpha + \beta^{(1)} / T ; \quad Z_2 = -\alpha + \beta^{(2)} / T .$$

Важным свойством рассмотренных моделей является учет динамики изменения параметра $X(t)$ при его движении к границам области работоспособности, при этом, вероятность невыхода параметра за допустимые границы определяется для каждого момента времени.

Возможность получения такой информации достигается введением аппроксимации (3), (15) для случайного процесса изменения определяющего параметра исследуемого процесса, которая зависит от характера физических процессов, протекающих в устройстве.

Для того чтобы найти время до начала массовых отказов системы $t=t_H$, при рассчитанных параметрах α и β , необходимо решить уравнение:

$$\frac{d^3 f(T)}{dT^3} = 0. \quad (19)$$

Это уравнение сводится к уравнению шестой степени. В результате его решения получается выражение, которое для практических целей можно аппроксимировать формулой:

$$q_H(\alpha) \approx 0.5 / \alpha . \quad (20)$$

Наработка до начала массовых отказов определяется выражением:

$$t_H = b_1 \cdot g_H(\alpha). \quad (21)$$

Ниже приведена программа оценки надежности радиоэлектронной системы по постепенным отказам на примере радиопередатчика [9]. Программа составлена в математическом редакторе *MathCAD*.

В качестве определяющего параметра радиопередающего устройства выберем мощность излучения P_u . Начальное значение мощности излучения $P_u=25$ кВт, предельно допустимое значение мощности излучения $P_u=20$ кВт. Скорость изменения определяющего параметра является случайной величиной b , распределенной по усеченному нормальному закону с математическим ожиданием $m_b = 5 \cdot 10^{-4}$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_b = 2 \cdot 10^{-6}$. Опре-

делим с учетом приведенных параметров наработку устройства до наступления массовых отказов.

ORIGIN:= 1

$P_0 := 25$ $P_{кр} := 20$

$m_b := 2.5 \cdot 10^{-4}$ $\sigma_b := 3.5 \cdot 10^{-4}$

Параметры альфа-распределения наработки на отказ:

$$\alpha := \frac{m_b}{\sigma_b} \qquad \beta := \frac{|P_{кр} - P_0|}{\sigma_b}$$

$$\alpha = 0.714 \qquad \beta = 1.429 \times 10^4$$

Альфа-распределение наработки на отказ:

$$f(t) := \frac{\beta}{t^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-0.5 \cdot \left(\alpha - \frac{\beta}{t} \right)^2 \right]$$

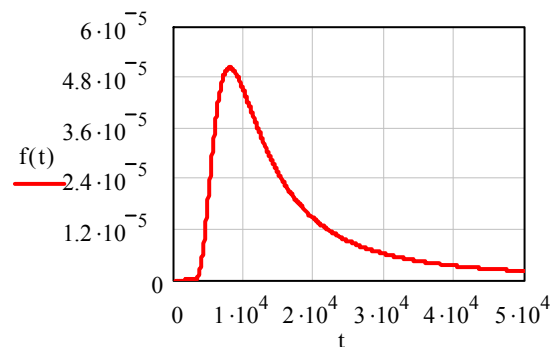


Рис.3. Плотность распределения наработки радиопередающего устройства на отказ
Вероятность безотказной работы системы

$$P(t) := 1 - \int_0^t f(x) dx$$

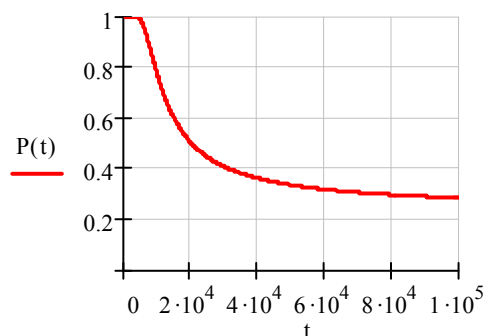


Рис.4. Вероятность безотказной работы радиопередающего устройства

Далее определяем наработку устройства до наступления массовых отказов:

$$q(\alpha) := \frac{0.5}{\alpha}$$

$$T := \beta \cdot q(\alpha)$$

$$T = 1 \times 10^4 \text{ час.}$$

Приведенная выше модель оценки надежности системы по определяющему параметру может быть также применена для оценки надежности информационных параметров входных сигналов. Например, при обработке сигналов от движущихся систем, возникает эффект Доплера, когда частота сигнала меняется с изменением скорости объекта. В этом случае для определения, например критического значения частоты или скорости объекта, при котором возможно принять полезный сигнал, может быть использовано рассмотренное выше и широко применяемое для оценки надежности технических систем α -распределение.

2.3. Оценка надежности и прогнозирование состояния информационной системы методом обобщенного параметра

В процессе функционирования, особенно в морских условиях, аппаратура изнашивается, а также подвергается значительным дестабилизирующим внешним воздействиям, которые порождают повреждения, со временем накапливаются, и снижают вероятность ее работоспособного состояния. Достигнув критического уровня, накопленные в результате эксплуатации повреждения приводят к отказу системы.

Одним из наиболее эффективных методов повышения эксплуатационной надежности является прогнозирование технического состояния системы, по результатам которого проводится корректировка ее параметров и замена устройств, выработавших свой ресурс. Для обеспечения надежности информационной системы целесообразно использовать *метод прогнозирования обобщенным параметром*.

Сущность этого метода заключается в том, что процесс, характеризуемый многими параметрами, описывается одномерной функцией, численные значения которой зависят от контролируемых параметров процесса. Такая функция рассматривается как обобщенный параметр процесса. Обобщенный параметр, таким образом, является математическим выражением, построенным из набора контролируемых параметров прогнозируемого объекта [1,3]. Примером такого рода объектов могут служить интегральные микросхемы, электромеханические

устройства и другие сложные устройства. При обобщении параметров приходится решать следующие задачи:

- определение относительных значений первичных параметров;
- оценку значений первичных параметров для общей оценки состояния устройства;
- построение математической модели для обобщенного параметра.

Определение относительных значений первичных параметров необходимо в связи с тем, что техническое состояние объекта характеризуется, как правило, параметрами, имеющими различную размерность. Поэтому все контролируемые параметры необходимо привести к единой системе исчисления, в которой они могут быть сравнены. Такой системой является система нормированного безразмерного исчисления.

Для реального применения метода необходимо выделить совокупность определяющих параметров X_1, X_2, \dots, X_M , и для каждого из них указать допустимые значения $X_{1кр}, X_{2кр}, \dots, X_{Mкр}$, а также некоторые оптимальные (номинальные) значения этих параметров $X_{ном}$. В этом случае безразмерный параметр может быть записан в виде [3, 5]:

$$\hat{X}_i(t) = \frac{X_i(t) - X_{iкр}}{X_{iном} - X_{iкр}}, \quad (22)$$

где $0 < \hat{X}_i < 1$.

Очевидно, что количественно одинаковые изменения рассматриваемых параметров не являются равнозначными по степени их влияния на изменения общей работоспособности объекта или устройства, поэтому необходимо учитывать их значимость. Это достигается с помощью специально вводимых весовых коэффициентов, величины которых характеризуют важность соответствующих параметров для процесса изменения технического состояния объекта.

Пусть, параметрам $\{\hat{X}\}$ соответствуют весовые коэффициенты $\{n_i\}$ причем $0 < n_i \leq 1$. Тогда, степень работоспособности устройства можно оценить с

помощью обобщенного выражения [3, 5]:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^m n_i \hat{X}_i^2(t), \quad (23)$$

где $Q(t)$ – обобщенный параметр объекта (устройства).

Обобщенный параметр можно выразить в другой форме, в виде произведения первичных параметров [5]:

$$Q(t) = \left\{ \prod_{i=1}^m \hat{X}_i^n(t) \right\}^{\frac{1}{m}}, \quad (24)$$

тогда выход любого параметра за допустимое значение, т.е. $X_i(t) = 0$, приводит автоматически к равенству $Q(t) = 0$. Это является достоинством приведенного выражения (24).

Обобщенные выражения по существу входящих в них компонентов выражают запас работоспособности многопараметрического объекта и позволяют проследить изменения работоспособности во времени.

Таким образом, задачу прогнозирования изменения работоспособности многопараметрического объекта, как уже говорилось выше, можно свести к прогнозированию одномерной временной функции вида (23), (24).

Ниже приведена программа прогнозирования времени отказа технической системы методом обобщенного параметра, на примере радиолокационной станции "Терма" [9]. Программа составлена в математическом редакторе *MathCAD*. Рассмотрим работу радиолокационной станции в течение 3000 часов. В качестве определяющих, выберем следующие параметры РЛС:

- рабочая частота f , ГГц;
- мощность излучения $P_{из}$, кВт;
- минимальная чувствительность радиоприемного устройства $P_{np(\min)}$, дБ;
- длительности импульса τ_u для различных шкал дальности ($D_{шк}=3; 6; 12$ миль; $D_{шк}=24; 48; 64$ мили), мкс;
- скорость вращения антенны, об/мин;
- изменение люфта антенны РЛС, мм;

- ширина диаграммы направленности (ДН) антенны в горизонтальной плоскости, град;
- ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости, град;
- коэффициент усиления антенны, дБ.

Значения определяющих параметров $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$, а также их номинальные $X_{ном}$, предельные значения $X_{кр}$ и весовые коэффициенты k_i приведены в таблице 3.1. Весовые коэффициенты определялись из соотношения значимости контролируемых параметров для прогнозирования долговечности.

Таблица 3.1

Параметры	Номинальные значения опред. параметров	Предельные значения опред. параметров	Весовые коэффициенты	<i>t, час</i>				
				0	500	1000	2000	3000
Рабочая частота, ГГц	$X_{ном} = 9,41$	$X_{кр} = 8.18$	$k_1 = 0,15$	9,41	9,41	9,4	9,38	9,33
Мощность излучения, кВт	$X_{ном} = 25$	$X_{кр} = 20$	$k_2 = 0,15$	25	25	23	22.5	21
Минимальная чувствительность радиоприемного устройства, дБ	$X_{ном} = -110$	$X_{кр} = -87$	$k_3 = 0,15$	-110	-108	-105	-97	-92
Длительность импульса $\tau_{и}$, мкс	$X_{ном} = 0,05$	$X_{кр} = 0,01$	$k_4 = 0,1$	0,05	0,048	0,04	0,038	0,025
Длительность импульса $\tau_{и}$, мкс	$X_{ном} = 0,25$	$X_{кр} = 0,1$	$k_5 = 0,1$	0,25	0,22	0,2	0,18	0,14
Скорость вращения антенны, об/мин	$X_{ном} = 20$	$X_{кр} = 15$	$k_6 = 0,07$	20	19	19	17	17
Изменение люфта антенны РЛС, мм	$X_{ном} = 0,3$	$X_{кр} = 1,2$	$k_7 = 0,06$	0,3	0,45	0,59	0,75	0,98
Ширина ДН в горизонтальной плоскости, град	$X_{ном} = 0,4$	$X_{кр} = 0,8$	$k_8 = 0,08$	0,4	0,43	0,5	0,61	0,68
Ширина ДН в вертикальной плоскости, град	$X_{ном} = 20$	$X_{кр} = 25$	$k_9 = 0,08$	20	20	22	22,5	23,3
Коэффициент усиления антенны, дБ	$X_{ном} = 36$	$X_{кр} = 30$	$k_9 = 0,6$	36	35	35	33	32

Прогнозирование времени отказа средств радиолокационного контроля методом обобщенного параметра:

ORIGIN:= 1

Значения определяющих параметров устройства в течение 3000 часов (для t=0; 500; 1000; 2000; 3000 часов):

$$M := \begin{pmatrix} 9.41 & 25 & -110 & 0.05 \cdot 10^{-6} & 0.25 \cdot 10^{-6} & 20 & 0.3 & 0.4 & 20 & 36 \\ 9.41 & 25 & -108 & 0.048 \cdot 10^{-6} & 0.22 \cdot 10^{-6} & 19 & 0.45 & 0.43 & 20 & 35 \\ 9.4 & 23 & -105 & 0.04 \cdot 10^{-6} & 0.2 \cdot 10^{-6} & 19 & 0.59 & 0.5 & 22 & 35 \\ 9.35 & 22.5 & -97 & 0.038 \cdot 10^{-6} & 0.18 \cdot 10^{-6} & 17 & 0.75 & 0.61 & 22.5 & 33 \\ 9.3 & 21 & -92 & 0.025 \cdot 10^{-6} & 0.14 \cdot 10^{-6} & 17 & 0.98 & 0.68 & 23.3 & 32 \end{pmatrix}$$

Предельные значения определяющих параметров устройства:

$$X_{кр} := (8.18 \ 20 \ -87 \ 0.01 \cdot 10^{-6} \ 0.1 \cdot 10^{-6} \ 15 \ 1.2 \ 0.8 \ 25 \ 30)$$

Оптимальные значения определяющих параметров устройства:

$$X_{ном} := (9.41 \ 25 \ -110 \ 0.05 \cdot 10^{-6} \ 0.25 \cdot 10^{-6} \ 20 \ 0.3 \ 0.4 \ 20 \ 36)$$

$$s := \text{cols}(M)$$

$$m := \text{rows}(M)$$

$$i := 1..m$$

$$j := 1..s$$

Находим безразмерный параметр:

$$X_{i,j} := \frac{M_{i,j} - X_{кр1,j}}{X_{ном1,j} - X_{кр1,j}}$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0.913	0.95	0.8	0.8	0.833	0.925	1	0.833
3	0.992	0.6	0.783	0.75	0.667	0.8	0.678	0.75	0.6	0.833
4	0.951	0.5	0.435	0.7	0.533	0.4	0.5	0.475	0.5	0.5
5	0.911	0.2	0.217	0.375	0.267	0.4	0.244	0.3	0.34	0.333

Найдем теперь обобщенный параметр устройства:

Значения весовых коэффициентов:

$$k := (0.15 \ 0.15 \ 0.15 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.07 \ 0.06 \ 0.08 \ 0.08 \ 0.06)^T$$

Задаем найденные ранее безразмерные параметры:

$$X1 := (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)^T$$

$$X2 := (1 \ 1 \ 0.913 \ 0.95 \ 0.8 \ 0.8 \ 0.833 \ 0.925 \ 1 \ 0.833)^T$$

$$X3 := (0.992 \ 0.6 \ 0.783 \ 0.75 \ 0.667 \ 0.8 \ 0.678 \ 0.75 \ 0.6 \ 0.833)^T$$

$$X4 := (0.951 \ 0.5 \ 0.435 \ 0.7 \ 0.533 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.475 \ 0.5 \ 0.5)^T$$

$$X5 := (0.911 \ 0.2 \ 0.217 \ 0.375 \ 0.267 \ 0.4 \ 0.244 \ 0.3 \ 0.34 \ 0.333)^T$$

Находим теперь обобщенный параметр устройства для $t = 0, 500; 1000; 2000; 3000$ часов:

$$Q1 := \left[\sum_{j=1}^{10} [k_j \cdot (X1_j)^2] \right] \quad Q2 := \left[\sum_{j=1}^{10} [k_j \cdot (X2_j)^2] \right] \quad Q3 := \left[\sum_{j=1}^{10} [k_j \cdot (X3_j)^2] \right]$$

$$Q1 = 0.856 \quad Q2 = 0.856 \quad Q3 = 0.582$$

$$Q4 := \left[\sum_{j=1}^{10} [k_j \cdot (X4_j)^2] \right] \quad Q5 := \left[\sum_{j=1}^{10} [k_j \cdot (X5_j)^2] \right]$$

$$Q4 = 0.358 \quad Q5 = 0.197$$

Решение задачи прогнозирования с помощью линейной функции
 $r(t) := b_1 + b_2 \cdot t$

Вводим полученные выше данные:

$$\text{data} := \begin{pmatrix} 0 & 1 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \\ 500 & 0.856 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \\ 1000 & 0.582 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \\ 2000 & 0.358 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \\ 3000 & 0.197 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \end{pmatrix}$$

$$X := \text{data}^{\langle 1 \rangle} \quad Y := \text{data}^{\langle 2 \rangle}$$

$$n := \text{rows}(\text{data}) \quad n = 5$$

$$b_1 := \text{intercept}(X, Y) \quad b_1 = 0.951$$

$$b_2 := \text{slope}(X, Y) \quad b_2 = -2.714 \times 10^{-4}$$

$$r(t) := b_1 + b_2 \cdot t$$

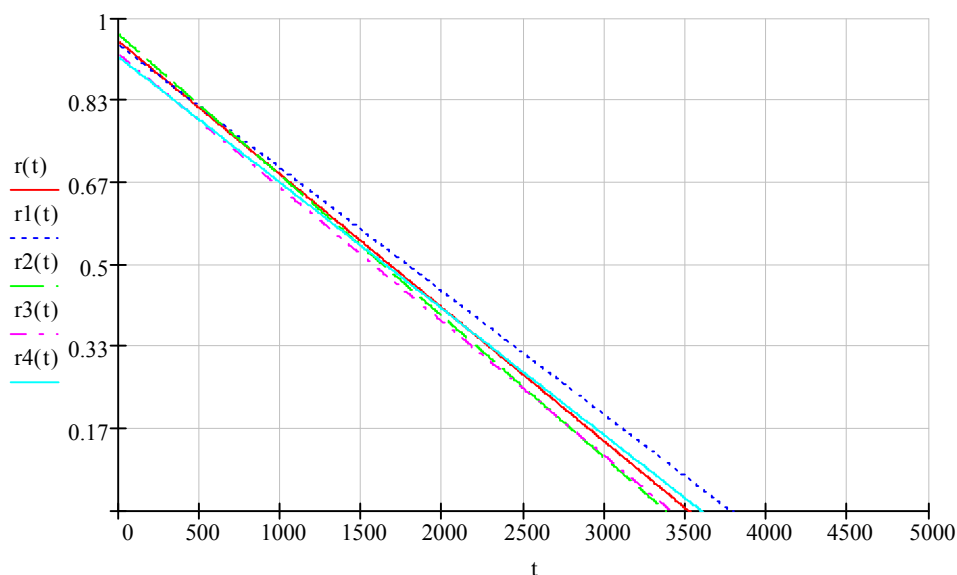


Рис. 3 – Степень спада прогнозирующей функции и время достижения критического значения (для пяти реализаций).

Таким образом, приведенная выше программа позволяет определить запас работоспособности аппаратуры и проследить ее изменение во времени. Для поддержания надежности на требуемом уровне необходимо проводить профилактическое обслуживание системы. Кроме этого, в связи с тем, что рассматриваемое измерительное устройство подвержено большому количеству внешних факторов (осадки, ветер и т.п.), кроме периодического технического обслуживания необходимо проводить регламентные работы и осуществлять наблюдение за устройством.

Приведенная модель также может быть использована для оценки информационных отказов и нарушений. В частности, на принимаемые и передаваемые сигналы воздействуют внешние дестабилизирующие факторы в виде различных шумов, посторонних сигналов, атмосферных помех и т.п., которые ухудшают значения параметров сигнала. Эти параметры можно объединить в обобщенный параметр и определить состояние отказа и время его наступления.

2.4. Многопараметрическое распознавание технического состояния сложных информационных систем

В качестве одного из методов повышения эксплуатационной надежности информационных систем можно использовать также диагностику технического состояния системы с помощью математической модели многопараметрического распознавания образов. Затем на основании полученных результатов можно проводить корректировку параметров системы и замену устройств, выработавших свой ресурс.

Сущность этого метода заключается в следующем. Распознавание образов – это отнесение исходных данных к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные из общей массы несущественных данных [8]. Т.е. необходимо определить порог, за которым складывается определенная комбинация показателей функционирования технической системы, определяющая общий неблагоприятный результат, который и будет критическим состоянием системы. Под критическим состоянием будем понимать такое состояние системы, когда необходимо производить техническое обслуживание системы или ее замену.

Особенностью решаемой задачи является то, что при множестве различных показателей, отражающих результаты функционирования технической системы, существует всего две альтернативы при принятии решения:

- отказ;
- работоспособное состояние.

Распознавание образа – это отнесение объекта к тому или иному классу S_1 или S_2 . задача распознавания образов включает три этапа [8, 12]:

- формирование признакового пространства;
- обучение распознающей системы – создание обобщенных классов отказавших S_2 и нормально функционирующих S_1 систем для снятия неопределенности с помощью обучающих наблюдений;
- принятие решений – отнесение системы к классу отказавших S_2 или к классу нормально функционирующих S_1 .

Статистический метод распознавания заключается в следующем. В ходе обучения формируются эталонные описания-оценки многомерных условных плотностей вероятности, которые содержат всю информацию, присутствующую в наблюдениях $x_1^1, \dots, x_m^1, \dots, x_1^p, \dots, x_m^p$ и обо всех взаимосвязях между признаками X_1, \dots, X_p [8]. Оценка $\hat{w}(\bar{x}_1, \dots, \frac{\bar{x}_m}{S_i})$ является случайной величиной. Для принятия решения используется статистика отношения правдоподобия

$$\hat{L}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) = \frac{\hat{w}\left(\bar{x}_1, \dots, \frac{\bar{x}_m}{S_1}\right)}{\hat{w}\left(\bar{x}_1, \dots, \frac{\bar{x}_m}{S_2}\right)}, \quad (25)$$

представляющая неотрицательную случайную величину, получаемую функциональным преобразованием $Z = \hat{L}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$, которое отображает точки n -мерного пространства выборок на действительную полуось. Таким образом, для вынесения решения достаточно использовать значение одной случайной величины – статистики отношения правдоподобия $\hat{L}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$, а не значения каждого элемента выборки (x_1, x_2, \dots, x_n) по отдельности, т.е. отношение правдоподобия несет всю статистическую информацию о классах, содержащуюся в данной выборке.

Рассмотрим далее методику многомерного распознавания состояний. Пусть на вход распознающей системы поступают многомерные (векторные) наблюдения, принадлежащие одному из двух состояний S_1 и S_2 , отличающихся своими неизвестными векторами средних a_1 и a_2 и ковариационными матрицами M_1 и M_2 . Оценки неизвестных векторов средних \hat{a}_1 и \hat{a}_2 определяются в ходе обучения с помощью выражений:

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} \bar{x}_i^{(1)}, \quad \hat{a}_2 = \frac{1}{m_2} \sum_{i=1}^{m_2} \bar{x}_i^{(2)}. \quad (26)$$

Оценки \hat{M}_1 и \hat{M}_2 неизвестных ковариационных матриц вычисляются в ходе обучения с помощью выражений:

$$\hat{M}_1 = \frac{1}{m_1 - 1} \sum_{i=1}^{m_1} (\bar{x}_i^{(1)} - \hat{a}_1)(\bar{x}_i^{(1)} - \hat{a}_1)^T; \quad (27)$$

$$\hat{M}_2 = \frac{1}{m_2 - 1} \sum_{i=1}^{m_2} (\bar{x}_i^{(2)} - \hat{a}_2)(\bar{x}_i^{(2)} - \hat{a}_2)^T.$$

Решающее правило будет иметь вид:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[(\bar{x}_i - \hat{a}_2)^T \hat{M}_2^{-1} (\bar{x}_i - \hat{a}_2) - (\bar{x}_i - \hat{a}_1)^T \hat{M}_1^{-1} (\bar{x}_i - \hat{a}_1) \right] + \frac{n}{2} \ln \frac{\det \hat{M}_2}{\det \hat{M}_1} \stackrel{\gamma_1}{>} \ln C, \quad (28)$$

где порог $\ln C = 0$, т.к. $C = I$ (в связи с использованием алгоритма максимального правдоподобия).

Вероятности ошибок многомерного распознавания состояний определяются выражением:

$$\alpha = \beta = F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right)F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right) + F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right)F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right) + \left[\frac{\sigma_1\sigma_2}{\sqrt{2\pi d(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)}} \right] \times \left[\sigma_2 \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma_1^2}\right) \left[F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right) - F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right) \right] - \sigma_1 \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma_2^2}\right) \left[F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right) - F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right) \right] \right], \quad (29)$$

где $F(x)$ – табулированный интеграл Лапласа;

σ_1^2 и σ_2^2 выражаются через объемы контрольных n и обучающих m выборок по формулам:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}; \quad \sigma_2^2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{4}{n}. \quad (30)$$

Ниже приведена диагностика критического состояния радиоэлектронной системы в сопоставлении с надежно функционирующими (S_1) системами $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_3^{(1)}, X_4^{(1)}$ и системами $X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, X_3^{(2)}, X_4^{(2)}, X_5^{(2)}$, в которых произошел отказ (S_2).

Для диагностики критического состояния исследуемой системы возьмем следующие показатели:

- рабочая частота;
- мощность излучения;
- скорость вращения антенны;
- минимальная чувствительность;
- длительность зондирующих импульсов;

- частота следования радиоимпульсов;
- коэффициент усиления антенны;
- ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости;
- ширина диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости.

В таблице 1 приведены параметры радиолокационных станций, которые могут использоваться в системах управления движением судов [11].

Таблица 1

Параметры	РЛС «Рейтеон»	РЛС «Терма»
Рабочая частота, ГГц	9,41	9,41
Мощность излучения, кВт	50	25
Скорость вращения антенны, об/мин	20	20
минимальная чувствительность, дБ	-110	-110
длительность зондирующих импульсов, мкс	0,06 (3600) мс 0,5 (1800) 1,0 (900)	0,05 (300– 4400) мс 0,25 (600– 3300)
частота следования радиоимпульсов, Гц	3600 (0,25; 0,5; 0,75; 1,5) 1800 (3; 6; 12) 900 (24; 48; 64)	800–4400 ($\tau_{И}=0,05\mu\text{с}$) 600–3300 ($\tau_{И}=0,25\mu\text{с}$)
коэффициент усиления антенны	36 дБ	36 дБ
ширина диаграммы направленности антенны:		
в горизонтальной плоскости, град	0,43	0,4
в вертикальной плоскости, град	19	20

Далее составляем таблицу с данными о надежно функционирующих системах и системах, в которых произошел отказ. Характеристики надежно функционирующих радиоэлектронных систем $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_3^{(1)}, X_4^{(1)}$, систем $X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, X_3^{(2)}, X_4^{(2)}, X_5^{(2)}$, в которых произошел отказ и исследуемой системы приведены в таблице 2.

Таблица 2

Признаки	S_1 (надежно функционирующие системы)										S_2 (системы, в которых произошел отказ)										Исследуемая система \bar{X}
	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$X_3^{(1)}$	$X_4^{(1)}$	$X_5^{(1)}$	$X_6^{(1)}$	$X_7^{(1)}$	$X_8^{(1)}$	$X_9^{(1)}$	$X_{10}^{(1)}$	$X_1^{(2)}$	$X_2^{(2)}$	$X_3^{(2)}$	$X_4^{(2)}$	$X_5^{(2)}$	$X_6^{(2)}$	$X_7^{(2)}$	$X_8^{(2)}$	$X_9^{(2)}$	$X_{10}^{(2)}$	
Рабочая частота, ГГц	9.4	9.41	9.5	9.41	9.4	9.6	9.55	9.474	9.556	9.328	8.183	7.388	9.014	12.464	9.952	10.95	11.629	9.361	10.246	9.896	9.4
Мощность излучения, кВт	25	25.5	24.6	24.618	24	26.5	25.1	25	24.947	24.4	15.765	37.584	30.101	24.618	22.752	26.538	16.723	28.73	24.947	20.823	25
Скорость вращения антенны, об/мин	20.1	20.3	20.4	20.5	20.32	20.41	20.12	20.25	20.7	20.6	22.696	21.093	22.025	14.22	14.474	14.483	17.964	13.434	5.798	26.381	21
минимальная чувствительность, дБ	-110	-111	-112	-113	-110.7	-114	-112.7	-113.5	-112.5	-114	-81	-83	-79	-85	-78	-89	-82	-87	-84	-85.7	-110
длительность зондирующих импульсов, мкс	0.25	0.264	0.27	0.25	0.245	0.252	0.25	0.28	0.25	0.269	0.139	1.167	0.072	0.107	0.206	0.252	0.185	0.327	0.361	0.502	0.3
частота следования радиоимпульсов, Гц	600	1800	800	3300	750	3200	2500	650	620	2400	2035	1141	283	1507	557.5	3245	2181	2266	1657	5155	2100
коэффициент усиления антенны	36	35	36	34	37	36	36	35	35	36	31.414	28.829	36.941	30.609	36.462	35.752	41.62	42.927	28.928	31.66	38
ширина ДН в горизонтальной плоскости	0.4	0.39	0.42	0.38	0.41	0.4	0.39	0.387	0.42	0.4	0.437	0.304	0.424	0.361	0.379	0.405	0.325	0.387	0.379	0.441	0.32
ширина ДН в вертикальной плоскости	20	21	20.8	20.7	20.6	20	20.1	20.4	19.99	20.5	24.071	16.507	20.859	22.992	20.639	25.939	25.645	15.229	19.995	22.876	22

Программа диагностики технического состояния радиоэлектронной системы составлена с помощью математического редактора MathCAD.

Программа диагностики технического состояния сложных береговых систем (статистическое распознавание состояний систем)

ORIGIN:= 1

Данные о надежном функционировании системы - X1

$$X1 := \begin{pmatrix} 9.4 & 9.41 & 9.5 & 9.41 & 9.4 & 9.6 & 9.55 & 9.474 & 9.556 & 9.328 \\ 25 & 25.5 & 24.6 & 24.618 & 24 & 26.5 & 25.1 & 25 & 24.947 & 24.4 \\ 20.1 & 20.3 & 20.4 & 20.5 & 20.32 & 20.41 & 20.12 & 20.25 & 20.7 & 20.6 \\ -110 & -111 & -112 & -113 & -110.7 & -114 & -112.7 & -113.5 & -112.5 & -114 \\ 0.25 & 0.264 & 0.27 & 0.25 & 0.245 & 0.252 & 0.25 & 0.28 & 0.25 & 0.269 \\ 600 & 1800 & 800 & 3300 & 750 & 3200 & 2500 & 650 & 620 & 2400 \\ 36 & 35 & 36 & 34 & 37 & 36 & 36 & 35 & 35 & 36 \\ 0.4 & 0.39 & 0.42 & 0.38 & 0.41 & 0.4 & 0.39 & 0.387 & 0.42 & 0.4 \\ 20 & 21 & 20.8 & 20.7 & 20.6 & 20 & 20.1 & 20.4 & 19.99 & 20.5 \end{pmatrix}$$

Данные о системах в которых произошел отказ - X2

$$X2 := \begin{pmatrix} 8.183 & 7.388 & 9.014 & 12.464 & 9.952 & 10.95 & 11.629 & 9.361 & 10.246 & 9.896 \\ 15.765 & 37.584 & 30.101 & 24.618 & 22.752 & 26.538 & 16.723 & 28.73 & 24.947 & 20.823 \\ 22.696 & 21.093 & 22.025 & 14.22 & 14.474 & 14.483 & 17.964 & 13.434 & 5.798 & 26.381 \\ -81 & -83 & -79 & -85 & -78 & -89 & -82 & -87 & -84 & -85.7 \\ 0.139 & 0.167 & 0.072 & 0.107 & 0.206 & 0.252 & 0.185 & 0.327 & 0.361 & 0.502 \\ 2035 & 1141 & 283 & 1507 & 557.5 & 3245 & 2181 & 2266 & 1657 & 5155 \\ 31.414 & 28.829 & 36.941 & 30.609 & 36.462 & 35.752 & 41.62 & 42.927 & 28.928 & 31.66 \\ 0.437 & 0.304 & 0.424 & 0.361 & 0.379 & 0.405 & 0.325 & 0.387 & 0.379 & 0.441 \\ 24.071 & 16.507 & 20.859 & 22.992 & 20.639 & 25.939 & 25.645 & 15.229 & 19.995 & 22.876 \end{pmatrix}$$

Данные о текущем состоянии анализируемой системы - X

$$X := (9.4 \ 25 \ 21 \ -110 \ 0.3 \ 2100 \ 38 \ 0.32 \ 22)^T$$

Параметр идентифицирующий принадлежность исследуемой системы - L

Вероятность достоверности принадлежности системы - D

```

R := | n ← 1
      | for i ∈ 1..rows(X1)
      |   a1i ←  $\frac{1}{\text{cols}(X1)} \cdot \sum_{j=1}^{\text{cols}(X1)} X1_{i,j}$ 
      |   for i ∈ 1..rows(X2)
      |     a2i ←  $\frac{1}{\text{cols}(X2)} \cdot \sum_{j=1}^{\text{cols}(X2)} X2_{i,j}$ 
      |     for i ∈ 1..rows(X1)
      |       for j ∈ 1..cols(X1)
      |         h1i,j ← X1i,j - a1i
      |     M1 ←  $\frac{1}{\text{cols}(X1)} \cdot h1 \cdot h1^T$ 
      |     for i ∈ 1..rows(X2)
      |       for j ∈ 1..cols(X2)
      |         h2i,j ← X2i,j - a2i
      |     M2 ←  $\frac{1}{\text{cols}(X2)} \cdot h2 \cdot h2^T$ 
      |     M ←  $\frac{\text{cols}(X1)}{\text{cols}(X1) + \text{cols}(X2) - 2} \cdot M1 + \frac{\text{cols}(X2)}{\text{cols}(X1) + \text{cols}(X2) - 2} \cdot M2$ 
      |     L ←  $\frac{n}{2} \cdot (a1 - a2)^T \cdot M^{-1} \cdot \left[ \frac{2}{n} \cdot X - (a1 + a2) \right]$ 
      |     d ←  $\sqrt{(a1 - a2)^T \cdot M^{-1} \cdot (a1 - a2)}$ 
      |     σ1 ←  $\sqrt{\frac{1}{\text{cols}(X1)} + \frac{1}{\text{cols}(X2)}}$ 
      |     σ2 ←  $\sqrt{\frac{1}{\text{cols}(X1)} + \frac{1}{\text{cols}(X2)} + \frac{4}{n}}$ 
      |     S1 ←  $\text{pnorm}\left(\frac{d}{\sigma1}, 0, 1\right) \cdot \text{pnorm}\left(\frac{-d}{\sigma2}, 0, 1\right) + \text{pnorm}\left(\frac{-d}{\sigma1}, 0, 1\right) \cdot \text{pnorm}\left(\frac{d}{\sigma2}, 0, 1\right)$ 
      |     S2 ←  $\left[ \sigma1 \cdot \exp\left(\frac{-d^2}{2 \cdot \sigma2^2}\right) \cdot \left( \text{pnorm}\left(\frac{d}{\sigma1}, 0, 1\right) - \text{pnorm}\left(\frac{-d}{\sigma1}, 0, 1\right) \right) \right]$ 
      |     S3 ←  $\left[ \frac{\sigma1 \cdot \sigma2}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot d \cdot (\sigma1^2 - \sigma2^2)} \cdot \left( \sigma2 \cdot \exp\left(\frac{-d^2}{2 \cdot \sigma1^2}\right) \cdot \text{pnorm}\left(\frac{d}{\sigma2}, 0, 1\right) - \text{pnorm}\left(\frac{-d}{\sigma2}, 0, 1\right) - S2 \right) \right]$ 
      |     D ← 1 - (S1 + S3)
      |     N ← (L D)

```

R = [(154.88817) (1)]

Полученные выше результаты ($L = 154,8881 > 0$) показывают, что исследуемая система является надежно функционирующей и далека от критического (отказного) состояния. При этом найденное решение справедливо с достоверностью $D = 1$.

Таким образом, рассмотренную выше математическую модель многопараметрического распознавания образов можно использовать для диагностики технического состояния морских информационных систем для определения сроков проведения технического обслуживания, проведения корректировки вышедших за допустимые пределы параметров, а также предотвращения отказов. Параметры сигнала, как уже отмечалось выше, также могут выходить за допустимые границы и приводить к информационным нарушениям. Поэтому рассмотренная выше математическая модель может быть использована как для оценки аппаратных отказов, так и для оценки информационных отказов и нарушений.

2.5. Анализ изменения качества информационной системы с учетом эксплуатационных параметров

Кроме моделей, рассмотренных выше, в анализе качества функционирования информационных систем может быть использована еще одна модель. Эта модель имеет два основных состояния устройства ($n = 2$, качество функционирования оценивается по уровням прогноза и предельного состояния системы), учитывает взаимосвязанное появление внезапных, постепенных и перемежающихся изменений и построена на гипотезе (для случая анализа надежности системы), что аварийный ремонт (АР) и профилактическое обслуживание (ПО) состоят из двух ($m = k = 2$) обобщенных операций с приведенными значениями интенсивностей μ и ξ . С помощью этой модели получим аналитические соотношения для практической оценки характеристик качества устройств [14].

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику изменения качества, имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\eta_0 + \lambda_0)p_0(t) + \theta p_1(t) + \mu p_3(t) + \xi p_5(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \eta_0 p_0(t) - (\lambda_1 + \eta_1 + \theta + \nu)p_1(t) + \mu p_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_0 p_0(t) + (\lambda_1 + \eta_1)p_1(t) - \mu p_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \mu p_2(t) - 2\mu p_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \nu p_1(t) - \xi p_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \xi p_4(t) - \xi p_5(t). \end{array} \right. \quad (31)$$

Для определения характеристик отдельных процессов (ухудшения качества, АР, ПО) необходимо рассматривать переходные режимы. Начнем с определения характеристик ухудшения качества. В этом случае в системе (31) необходимо положить ν , ξ , μ , θ равными нулю, тогда в ней останутся первые три уравнения, решение которых при самых общих начальных условиях позволяет найти характеристики качества функционирования исследуемой системы.

Для случая, когда под качеством понимается надежность системы, вероятность безотказной работы определяется выражением:

$$P(t) = p_0 \left(1 + \frac{\eta_0}{\alpha_1 - \alpha_0} \right) e^{-\alpha_0 t} + \left(p_1 + \frac{\eta_0 p_0}{\alpha_0 - \alpha_1} \right) e^{-\alpha_1 t}, \quad (32)$$

где $\alpha_i = \lambda_i + \eta_i$.

Плотность этой вероятности

$$f(t) = \alpha_0 p_0 \left(1 + \frac{\eta_0}{\alpha_1 - \alpha_0} \right) e^{-\alpha_0 t} + \alpha_1 \left(p_1 + \frac{\eta_0 p_0}{\alpha_0 - \alpha_1} \right) e^{-\alpha_1 t}; \quad (33)$$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

$$\Lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}; \quad (34)$$

среднее время безотказной работы

$$T_0 = \frac{p_0}{\alpha_0} \left(1 + \frac{\eta_0}{\alpha_1} \right) + \frac{p_1}{\alpha_1}; \quad (35)$$

дисперсия времени

$$\sigma_t^2 = 2 \left[\frac{p_0}{\alpha_0^2} \left(1 + \frac{\eta_0}{\alpha_1 - \alpha_0} \right) + \frac{1}{\alpha_1^2} \left(p_1 + \frac{\eta_0 p_0}{\alpha_0 - \alpha_1} \right) \right] - T_0^2; \quad (36)$$

вариация времени

$$V_t = \sigma_t T_0 - 1. \quad (37)$$

Чтобы найти закон распределения и числовые характеристики определяющего параметра, методом наименьших квадратов найдем оптимальные квантовые значения x_i^* из условия

$$\frac{\partial}{\partial x_i^*} \left\{ \left[m_x \left(t = \frac{p_0}{\alpha} \right) - x_0 \right]^2 + \left[m_x(t = T_0) - x_1 \right]^2 \right\} = 0, \quad i = \overline{0, 2}, \quad (38)$$

где $m_x(t) = x_0^* p_0(t) + x_1^* p_1(t) + x_2^* p_2(t)$;

$$p_0(t) = p_0 e^{\alpha_0 t};$$

$$p_1(t) = \frac{\eta_0 p_0}{\alpha_1 - \alpha_0} e^{\alpha_0 t} + \left(p_1 + \frac{\eta_0 p_0}{\alpha_0 - \alpha_1} \right) e^{\alpha_1 t};$$

$$p_2(t) = 1 - p_0(t) - p_1(t).$$

Математическое ожидание выходного параметра

$$m_x(t) = \sum_{i=0}^2 x_{i\text{onm}}^* p_i(t). \quad (39)$$

Дисперсия выходного параметра

$$\sigma_x^2(t) = \sum_{i=0}^2 (x_{i\text{onm}}^*)^2 p_i(t) - m_x^2(t). \quad (40)$$

Вычислим далее коэффициенты асимметрии и эксцесса вспомогательного распределения

$$A = \frac{m_3(t)}{\sigma_z^3(t)}, \quad (41)$$

$$E = \frac{m_4(t)}{\sigma_z^4(t)} - 3, \quad (42)$$

где

$$m_3(t) = \sum_{i=0}^2 \left[\frac{x_{ionm}^* - m_x(t)}{\sigma_x(t)} \right]^3 p_i(t); \quad (43)$$

$$m_4(t) = \sum_{i=0}^2 \left[\frac{x_{ionm}^* - m_x(t)}{\sigma_x(t)} \right]^4 p_i(t); \quad (44)$$

$$\sigma_z^2(t) = \sum_{i=0}^2 \left[\frac{x_{ionm}^* - m_x(t)}{\sigma_x(t)} \right]^2 p_i(t) - \left[\sum_{i=0}^2 \left[\frac{x_{ionm}^* - m_x(t)}{\sigma_x(t)} \right] p_i(t) \right]^2. \quad (45)$$

А также найдем плотность распределения выходного параметра

$$\omega[x(t)] = \frac{1}{\sigma_x(t)} \left[\Phi'(z) - \frac{A}{3!} \Phi^4(z) + \frac{E}{4!} \Phi^5(z) - \dots \right]. \quad (46)$$

Таким образом, по известному диапазону допустимого изменения определяющего параметра и интенсивностям пересечения случайной функцией выбранных уровней квантования с помощью соотношений (32) – (46) можно определить все основные характеристики качества функционирования навигационных приборов.

Чтобы получить характеристики качества функционирования навигационных приборов в установившемся режиме эксплуатации и в дежурном режиме, рассмотрим состояние статистического равновесия. Полагая в системе (31) и учитывая условие нормировки, найдем:

$$P_0 = \frac{\xi \mu(\theta + \nu + 0.5\alpha_1)}{\xi [\mu(\theta + \nu + \alpha_0 + 0.5\alpha_1 - 0.5\lambda_0) + 1.5\lambda_0(\theta + \nu) + 1.5\alpha_0\alpha_1] + 2\nu\mu(\alpha_0 - 0.5\lambda_0)}; \quad (47)$$

$$P_1 = \frac{\xi \mu (\alpha_0 - 0.5 \lambda_0)}{\xi [\mu (\theta + \nu + \alpha_0 + 0.5 \alpha_1 - 0.5 \lambda_0)] + 1.5 [\lambda_0 (\theta + \nu) + \alpha_0 \alpha_1] + 2 \nu \mu (\alpha_0 - 0.5 \lambda_0)}; \quad (48)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_0 \xi [\alpha_0 \alpha_1 + \lambda_0 (\nu + \theta)]}{\xi [\alpha_0 \alpha_1 + \lambda_0 (\nu + \theta)] (1.5 \lambda_0 + \mu) + \mu (\eta_0 + 0.5 \lambda_0) [\xi (\lambda_0 - \alpha_1) + 2 \nu \lambda_0]}. \quad (49)$$

Коэффициент готовности исследуемой системы

$$K_z = \frac{\mu [(\eta_0 + 0.5 \lambda_0) (\lambda_0 - \alpha_1) + [\alpha_0 \alpha_1 + \lambda_0 (\nu + \theta)]]}{\lambda_0 [\alpha_0 \alpha_1 + \lambda_0 (\nu + \theta)]} P_2, \quad (50)$$

коэффициент простоя на аварийном ремонте

$$K_p = 1.5 P_2, \quad (51)$$

коэффициент простоя на профилактическом обслуживании

$$K_n = \frac{2 \nu \mu (\eta_0 + 0.5 \lambda_0)}{\xi [\alpha_0 \alpha_1 + \lambda_0 (\nu + \theta)]} P_2. \quad (52)$$

Характеристики m_x , σ_x , $\omega(x)$ определяют по формулам (39) – (46). Особенностью является то, что они не зависят от времени. Коэффициент надежности исследуемой системы, используемой в дежурном режиме, рассчитывается с помощью выражения:

$$k(t) = \frac{K_z}{T_0} \int_t^\infty P(\tau) d\tau, \quad (53)$$

где характеристики $P(\tau)$, T_0 и K_z определяются по формулам (32), (35), (50) соответственно.

Полученные соотношения позволяют по относительно простой исходной статистике оценить наиболее часто применяемые в практическом анализе характеристики качества функционирования исследуемой системы в любых режимах ее использования: при однократном применении, при непрерывном использовании и при работе в дежурном режиме. При больших вариациях оценок интенсивностей необходимо прибегать к методу линеаризации для определения начальных и центральных моментов характеристик качества.

Заключение

В представленной работе приведены модели и примеры оценки параметрической надежности аппаратуры, а также высказана концепция о возможности применения этих методов к анализу качества и надежности передаваемой или обрабатываемой информации. В частности, при обработке информации от движущихся систем может быть использовано широко применяемое при оценке надежности технических систем альфа-распределение. Для определения состояния информационного отказа и времени его наступления можно применить метод определяющего параметра или методику многопараметрического распознавания состояния системы. Однако следует отметить, что изложенная в начале работы теория применимости методов оценки технической надежности, которая базируется на теории вероятностей и теории случайных процессов к информационным процессам (а обработка сигналов связана с применением теории случайных процессов), конечно, имеет ограниченное применение. Однако в ряде задач, перечисленных ранее, эта концепция может быть применена, что существенно облегчает исследование информационной надежности, основой которой является теория случайных процессов. В работе также высказана оценка высказывания, приведенного в книге Дмитриева С.П. и др. «Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем» [3] о свойстве информационного отказа к самовосстановлению. Если сделать указанные в [3] допущения, то необходимо к классической теории надежности сделать существенные дополнения, в частности о распределениях времени самовосстановления. Т.е. для случая самовосстанавливаемого информационного отказа применение классической теории надежности возможно при условии, если известны данные о времени самовосстановления.

Библиографический список

1. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 458 с.
2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 506 с.: ил.
3. Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. Изд. 2-е, переработанное – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. – 208 с.
4. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2005. 479 с: ил.
5. Системный анализ надежности морского радиоэлектронного оборудования/ Лицкевич А.П., Бойко А.И., Карбовец Н.В., Демьянов В.В. – Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 2008. – 178с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: 1969.
7. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. Радио, 1974.
8. Фомин Я.А. Диагностика кризисного состояния предприятия: Учеб. пособие для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 349 с.
9. Старжинская Н.В. Прикладные вопросы надежности информационных систем.– Новороссийск, МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова. 2010. – 88 с.
10. Старжинская Н.В., Лицкевич С.А. Обеспечение эксплуатационной надежности адаптирующейся системы радиолокационных датчиков ближнего действия для повышения безопасности мореплавания (статья). – Материалы седьмой региональной научно-технической конференции: Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Ч.2 – Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2008.
11. Старжинская Н.В., Авдонькин Д.С. Роль резерва времени на принятие решения судоводителем при прохождении узкостей и проливов (статья). – Сборник научных трудов. Выпуск 13. – Новороссийск: РИО МГА им. адм.

Ф.Ф.Ушакова, 2009.

12. Старжинская Н.В., Лицкевич С.А. Многопараметрическое распознавание технического состояния сложных береговых систем (статья). – Материалы восьмой региональной научно-технической конференции: Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Ч.2 – Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2010.

13. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах. Учеб. пособие для студентов радиотехнических специальностей ВУЗов. Под ред. Г.В. Дружинина. М., Энергия, 1976. – 448 с. с ил.

14. Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Трайнев В.А. Статистическая оптимизация качества функционирования электронных систем. Под ред. Е.Г. Коновалова. М., «Энергия», 1974. 264 с. с ил.

15. Ермаков А.А. Основы надежности информационных систем: Учебное пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2006.–151с.

16. Сборник задач по теории надежности (под редакцией Половко А.М. и Маликова И.М.), М.: Сов. Радио, 1972. – 139 с.

17. Зеленцов В.А., Гагин А.А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи. МО СССР, 1991 – 169 с.

3. Интерполирование интенсивностей постепенных отказов в марковской модели эксплуатационного процесса / А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец. Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 6. Новороссийск. РИО НГМА. 2001.

Обеспечение надежности сложных технических систем – важнейшая эксплуатационная задача. Это касается, в первую очередь, транспортных средств и систем (морских судов, воздушных судов), морских информационных систем связи, которые должны обеспечивать безопасность мореплавания, а также охрану человеческой жизни на море. Одним из эффективных методов повышения надежности в процессе эксплуатации системы является прогнозирование ее технического состояния (в частности отказов) и выработка, на основе полученной информации, решений о периоде технического обслуживания объектов и профилактической регулировке их параметров[1].

Поскольку сложная система характеризуется большим числом параметров, то среди них выбирают наиболее значимый, называемый определяющим параметром, степень изменения которого и определяет периодичность проведения профилактических работ. Определяющими параметрами могут быть точность определения координат в системе радиоэлектронного обнаружения, быстродействие вычислительного модуля, чувствительность приемного устройства контрольно-корректирующей станции т.д.

В процессе эксплуатации системы вследствие действия дестабилизирующих факторов параметры ее изменяются случайно во времени и имеют различные законы распределения. Если отказы внезапные, то они распределены по экспоненциальному закону, параметром которого является постоянная интенсивность отказов. Постепенные отказы, в отличие от внезапных, имеют интенсивность отказов, зависящую от времени. В общем случае интенсивность отказов $\lambda(t)$ связана с частотой отказов и вероятностью и определяется следующим соотношением:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}, \quad (1)$$

где $f(t)$ – частота (плотность распределения) отказов,

$p(t)$ – вероятность безотказной работы системы.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ является одним из основных показателей безотказности системы. Но соотношение (1) для законов, отличных от экспоненциального (например, нормального) получается громоздким для расчетов, и поэтому для практических приложений его каким-либо способом упростить.

Расчет эксплуатационных характеристик сложной системы требует построения математической модели, вследствие многофакторного взаимодействия ее с окружающей средой. Во многих случаях для описания эволюции эксплуатационных параметров используется хорошо разработанная однородная марковская модель, описывающая эксплуатационные процессы с внезапными отказами. Но к системам с постепенными отказами такая модель, в общем случае, неприменима. Это, в частности, означает, что вероятность постепенного отказа зависит от предшествующей наработки системы, т.е. для этого вида отказов необходимо учитывать информацию о состоянии системы в прошлом.

Рассмотрим постепенные изменения параметров системы во времени и связанные с ними распределения. Нахождение распределения наработки до отказа $f(t)$ [2,3] может быть осуществлено введением функции изменения определяющего параметра $W_1(t)$, которая, как правило, представляется случайной верной функцией $W(t)$ вида [2]

$$W(t) = \omega_0 + bt, \quad (2)$$

где b – скорость изменения определяющего параметра (скорость разрегулирования) – является случайной величиной и распределена по нормальному закону, а t отсчитывается от момента проведения профилактической работы; ω_0 – начальное значение параметра.

Распределение скорости разрегулирования определяется выражением:

$$f(b) = \frac{c}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(b - m_b)^2}{2\sigma_b^2}\right], \text{ при } b_1 \leq b \leq b_2, \quad (3)$$

где m_b – средняя плотность процесса изменения параметра;

σ_b – среднее квадратическое отклонение величины b .

Назначим значение определяющего параметра $W(t) = \omega$, при котором наступает отказ. Здесь ω – критическое значение регулируемого определяющего параметра (при таком значении $W(t)$ объект считается неработоспособным). Время наработки до потери работоспособности имеет вид

$$T = \frac{|\omega - \omega_0|}{B}, \quad (4)$$

где T – функция случайной величины B .

Поскольку надежность является функцией времени, то необходимо найти плотность распределения определяющего параметра в зависимости от времени. Находим плотность распределения случайной величины T , применив правило получения законов распределения функций случайных аргументов:

$$f(t) = \frac{|\omega - \omega_0|c}{\sigma_b t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{|\omega - \omega_0|}{\sigma_b t} - \frac{m_b}{\sigma_b} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{|\omega - \omega_0|}{\sigma_b}; \\ \alpha &= \frac{|m_b|}{\sigma_b}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Тогда распределение наработки до выхода регулируемого определяющего параметра за границу допуска примет вид:

$$f(t) = \frac{c\beta}{t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{t} - \alpha \right)^2 \right], \quad (7)$$

где β – относительный запас долговечности,

α – относительная средняя скорость изменения параметра или коэффициент однородности скорости изменения параметра.

Параметр β имеет размерность времени, параметр α безразмерен.

Распределение (7) называется *альфа-распределением* (*α -распределением*) [2,3].

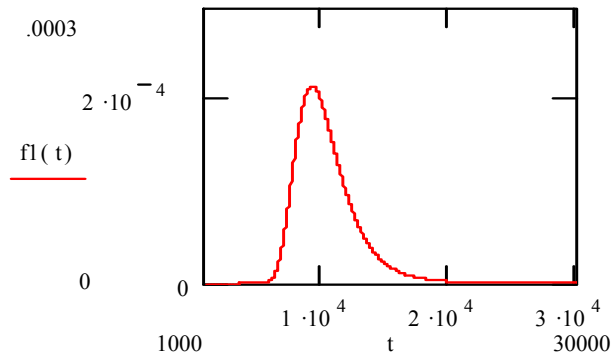


Рис.1. Функция плотности распределения $f(t)$

Из формулы плотности распределения $f(t)$ можно найти время начала массовых отказов t_n , при которой начинается их быстрый рост. Это значение находится из уравнения $\frac{d^3 f(t)}{d^3 t} = 0$

Для прогнозирования технического состояния и учета постепенных отказов в эксплуатационном процессе представляет интерес использовать однородную марковскую модель. Выше было сказано, что в общем случае этого сделать нельзя. Однако результат вычисления функции $L(t) = \int_0^t \lambda(u) du$, приведенный на рис.2 показывает, что в определенных пределах функция $L(t)$ имеет линейный участок. Поскольку вероятность безотказной работы системы имеет вид $P(t) = e^{-L(t)}$, то следует считать, что тангенс угла наклона прямолинейного участка $L(t)$ является постоянной интенсивностью отказов λ_p . Это значение можно использовать в марковской модели, для вычисления эксплуатационных характеристик системы и прогнозировать ее поведение, проинтерполировав функцию $L(t)$.

Современное программное обеспечение позволяет получить аналитический вид $L(t)$ путем интерполирования следующими способами:

- линейная интерполяция;
- кубическая интерполяция сплайнами;
- полиномиальная регрессия.

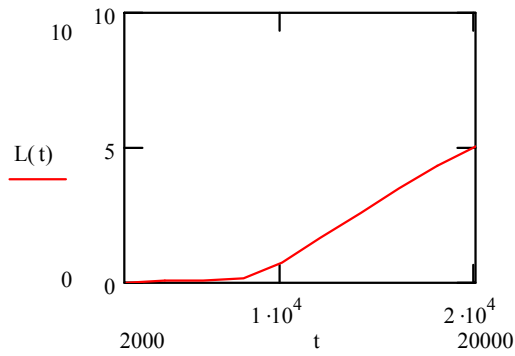


Рис.2. $L(t)$ – интеграл от интенсивности отказов α -распределения

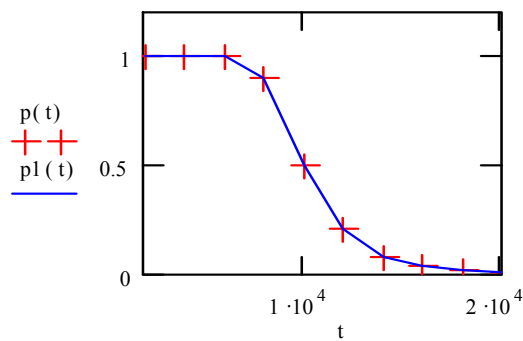


Рис.3. $p_1(t)$ – вероятность безотказной работы системы, выраженная в экспоненциальной форме

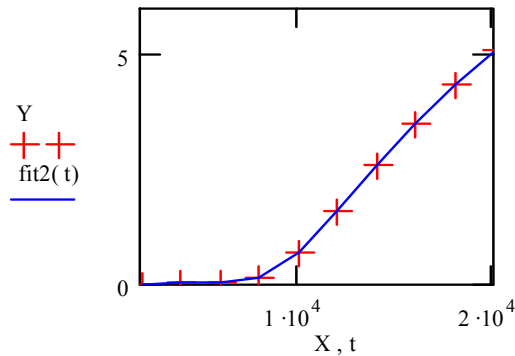


Рис. 4. Аппроксимация интеграла от интенсивности отказов методом кубической интерполяции сплайнами

Результаты применения интерполяционных программ представлены на рис.3, рис.4.

Таким образом, интерполяция линейного участка $L(t)$ во временном интервале от 10^4 до $2 \cdot 10^4$ часов позволяет использовать марковскую модель эксплуатационного процесса. Во временной области от 0 до 10^4 часов она близка к

нулю, что свидетельствует об отсутствии влияния постепенных отказов в этой области.

Литература

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы теории надежности. М.: Наука, 1965.
2. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. М.: Энергоиздат, 1986.
3. Лицкевич А.П., Демьянов В.В. Прикладная теория надежности радиоэлектронного оборудования и морских информационных систем. Новорос-сийск: НГМА, 2000.

4. Информационный подход к анализу качества и эффективности морских систем / Н.В. Карбовец. Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 7. Новороссийск. РИО НГМА. 2002.

Надежность и качество имеют огромное значение при эксплуатации таких морских систем как СУДС, ГМССБ, АИС и др., предназначенных для обеспечения безопасности мореплавания. Однако критерий надежности, хотя и является важнейшим, недостаточен для полной оценки эксплуатационных свойств систем. Действительно, не имеет значения, по какой причине система не выполнила поставленную ей задачу – из-за недостаточной надежности при высокой ее точности или наоборот – невысокой точности при высокой надежности. Поэтому для оценки систем обеспечения безопасности движения требуется введение критериев более полно характеризующих ее назначение, в частности эффективности. Как показывают исследования при формулировании критерия эффективности удастся учесть одновременно как точность, так и надежность.

Под *эффективностью* системы управления следует понимать успешность выполнения ею поставленной конечной задачи управления. Получение заданного результата управления представляет собой случайное событие, так как процесс управления – случайный процесс (т.к. действуют различные непредсказуемые дестабилизирующие факторы, например, ветер, волнение моря, человеческий фактор). Тогда в качестве общего критерия эффективности системы управления используется вероятность выполнения поставленной задачи (получения заданного результата управления).

$$W = P(A),$$

где A – случайное событие, заключающееся в том, что поставленная задача будет выполнена (заданный результат управления будет получен).

Но для полной оценки назначения системы необходимо учитывать большее количество определяющих параметров, чем просто выполнение поставленной задачи, или хотя бы двух – точности и надежности. Поэтому для информа-

ционных систем, таких как АИС, СУДС удобно использовать информационный подход, который позволяет учесть одновременно как точность, так и надежность.

Для информационной системы в качестве эффективности используется величина отношения количества информации, полученного на выходе ИИС за время ее работы $I_y(t)$, к количеству информации $I_x(t)$, поступившей на ее вход за то же время:

$$W(t) = \frac{I_y(t)}{I_x(t)} = \frac{I_x(t) - \Delta I(t)}{I_x(t)} \quad (1)$$

При этом

$$\Delta I(t) = I_x(t) - I_y(t), \quad (2)$$

отражает суммарные потери информации в ИИС за время t из-за ограниченной её точности и надёжности. Величина $W(t)$ показывает какую долю входной информации обеспечивает ИИС на выходе за время работы t . Чем больше величина $W(t)$, тем эффективней система. Выражение для эффективности информационно-измерительной системы (ИИС) показывает, что увеличение надежности $W_H(t)$ и уменьшение ошибки системы σ_ε увеличивают ее эффективность (снижают потери информации).

Рассмотрим структурную схему нашей системы управления (рис.5). На вход информационно-измерительной системы (РЛС) сигналы, несущие информацию о состоянии объекта управления (судна), которая после отбора и обработки подаётся на регулятор (СУДС).

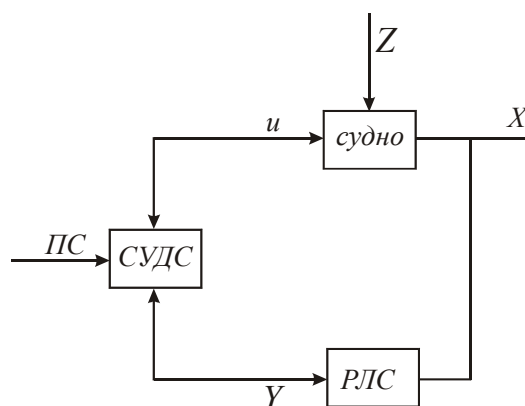


Рис. 1. Общая структура большой системы управления: судно – объект управления; СУДС – регулятор; РЛС – информационно-измерительная система (ИИС)

Источником входной информации являются регистрируемые РЛС параметры судна. На каждый сигнал накладывается погрешность измерительного прибора (датчика), которая рассматривается как помеха – «шум». В процессе обработки в РЛС сигнал претерпевает преобразования в различных её блоках, при этом на каждом этапе преобразования к сигналу добавляется «шум» в виде погрешности блоков. Все эти «шумы» ведут к потере информации в системе. Будем считать, что величина «шума» определяется не только погрешностями измерения и преобразования, но и отказами системы.

Будем считать, что ИИС (см. рис.1) является линейной невозстанавливаемой системой и на ее выходе должен воспроизводиться сигнал, поступающий на вход. Необходимое время работы системы равно t . Воспользуемся энтропийной мерой оценки случайных процессов, в частности понятием энтропийной мощности.

С точки зрения теории информации количество информации, полученное в результате любого сообщения (измерения), равно убыли неопределенности, т. е. разности энтропии до и после получения сообщений.

В соответствии с 10-й и 16-й теоремами Шеннона присутствие в канале передачи информации независимой аддитивной нормальной помехи (в нашем случае погрешности ИИС – σ_ε) уменьшает энтропию входного сигнала X до величины

$$H_0 = H(x, \varepsilon) - H(\varepsilon), \quad (3)$$

где $H(x, \varepsilon)$, $H(\varepsilon)$ – соответственно энтропии принимаемого сигнала и «шума».

При заданной σ_ε^2 энтропия шума

$$H(\varepsilon) = \ln \sqrt{2\pi e \sigma_\varepsilon^2}. \quad (4)$$

Энтропия принимаемого сигнала $H(x, \varepsilon)$ будет максимальна, когда выходное сообщение Y является суммой полезного сообщения X и шума ε , распределенного по нормальному закону.

$$H(x, \varepsilon) = \ln \sqrt{2\pi e(\sigma_x^2 + \sigma_\varepsilon^2)}, \quad (5)$$

где σ_x^2 и σ_ε^2 – дисперсии значений сигнала и шума

Тогда количество информации $I_x(t)$ на входе

$$I_x(t) = \Omega t \ln \sigma_x^2 2\pi e. \quad (6)$$

Учитывая, что из-за отказов система проработает не t , а некоторое время t_1 , определяемое ее надежностью

$$t_1 = \int_0^t P(t) dt, \quad (7)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы ИИС.

Тогда количество информации на выходе ИИС

$$I_y(t) = \frac{1}{2} W_H(t) F t \ln \frac{\sigma_x^2 + \sigma_\varepsilon^2}{\sigma_\varepsilon^2}, \quad (8)$$

где $W_H = \frac{t_1}{t}$,

F – частота опроса параметров системы (полоса пропускания),

Ω – частота изменения параметров объекта

Тогда выражение для эффективности ИИС, которую назовем интегральной, запишется:

$$W(t) = \frac{F W_H(t)}{2\Omega} \left(1 - \frac{\ln \sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi e}}{\ln \sigma_x \sqrt{2\pi e}} \right). \quad (9)$$

Эффективность будет наибольшей, если частота опроса параметров $F=2\Omega$.

Выражение (9) показывает, что увеличение надежности $W_H(t)$ и уменьшение ошибки системы σ_ε увеличивают ее эффективность (снижают потери информации).

При заданной $W(t)$ можно определить точность σ_ε .

Таким образом, теория информации позволяет увязать такие важные показатели работоспособности системы, как точность и надежность, и получить количественные критерии качества, например интегральную эффективность.

В более общем случае такая методика определения, например $W(t)$, может быть распространена и на многоканальные ИИС. Считается, что каждый канал такой системы вносит определенную и независимую долю в общий выходной эффект. Тогда общий выходной эффект ИИС будет определяться суммированием $W_j(t)$ по каждому из каналов с учетом их информационной значимости для системы управления в целом. Величина $W_j(t)$ может быть определена по формуле (9).

Влияние надежности на эффективность информационных систем

Величина шума определяется не только погрешностями измерения и преобразования, но и отказами системы, поэтому необходимо учитывать внезапные и постепенные отказы. Вероятность безотказной работы информационной системы (РЛС) определяется выражением $P(t) = \exp(-\lambda t)$.

Вероятность безотказной работы РЛС относительно постепенных отказов определяется выражением

$$P_{II}(t) = 1 - c \int_0^t f(t) dt = 1 - \frac{c\beta}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{t^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{t} - \alpha\right)^2\right] dt. \quad (10)$$

Применяя в (10) подстановку

$$z = \frac{\beta}{t} - \alpha \quad (11)$$

ряда преобразований и принимая, что при $\alpha \geq 2$ нормирующий множитель $c=1$, имеем

$$P_{II}(t) \approx \frac{1}{2} + \Phi(z), \quad (12)$$

где интеграл вероятностей

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (13)$$

Выражение (12) имеет смысл для эффективности РЛС, пока $P_{\Pi}(t)$ не станет равной 0,5 в момент времени $t=\beta/\alpha$. Этот момент времени обозначим через θ . Поэтому анализ эффективности будем вести лишь для моментов времени работы $t \leq \theta$. Представим выражение (12) в виде ломаной $P^*_{\Pi}(t)$, изображенной на рис. 2:

$$P^*_{\Pi}(t) = 1, \text{ при } 0 < t < t_H \quad (14)$$

$$P^*_{\Pi}(t) = 1 - \frac{t - t_H}{2(\theta - t_H)}, \text{ при } t_H < t < \theta.$$

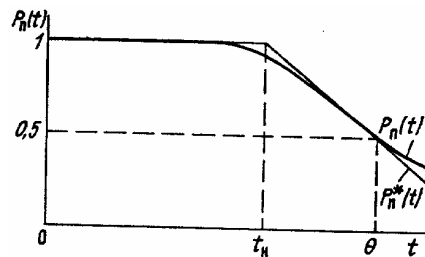


Рис. 2. Аппроксимация зависимости $P_{\Pi}(t)$ и ее характерные точки t_H и θ

При этом момент времени t_H является точкой перегиба аппроксимирующей ломаной $P^*_{\Pi}(t)$. Таким образом, до момента времени t_H постепенными отказами можно пренебречь, так как $P_{\Pi}(t) = 1$.

Реальная РЛС из-за отказов проработает не t , а некоторое время t_1 , определяемое ее надежностью:

$$t_1 = \int_0^t P(t) dt, \quad (15)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы ИИС.

Введя величину $W_H(t) = \frac{t_1}{t} = \frac{1}{t} \int_0^t P(t) dt$, окончательно с учетом принятых допущений формулы для вычисления $W_H(t)$ будут иметь вид:

при $t < t_H$

$$W_{H1}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t e^{-\lambda t} dt = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda t}, \quad (16)$$

при $t_H < t < \theta$

$$W_{H2}(t) = \frac{1}{t} \int_0^{t_H} e^{-\lambda t} dt + \int_0^t e^{-\lambda t} \left(1 - 0,5 \frac{t - t_H}{\theta - t_H} \right) dt = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda t} - \frac{e^{-\lambda t_H} - e^{-\lambda t} [1 + \lambda(t - t_H)]}{2\lambda^2 + (\theta - t_H)}, \quad (17)$$

где λ – интенсивность отказов системы.

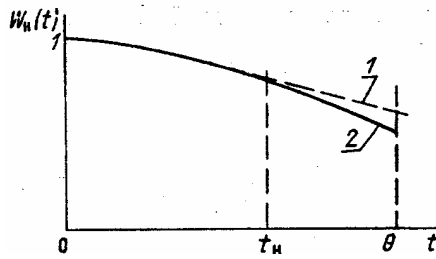


Рис. 3. Зависимость $W_H(t)$: 2 – с учетом постепенных отказов; 1 – без учета

Из рис. 3. видно, что величина $t=t_H$ является границей применения формулы (16), т.е. показатель эффективности ИИС $W_H(t)$ полностью определяется внезапными отказами и сбоями. При $t>t_H$ учет постепенных отказов обязателен и может быть сделан по общей формуле (17).

Формализация выбора требований к точности и надежности систем

Формулировка требований к точности и надежности ИИС может быть получена на основе анализа ее эффективности.

Рассмотрим зависимость $W(t)$ от характеристик ИИС. Запишем выражение (9). Тогда при $0<t<t_H$

$$W(t) = \frac{F}{2\Omega} W_{H1}(t) \left(1 - \frac{\ln \sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi e}}{\ln \sigma_x \sqrt{2\pi e}} \right), \quad (18)$$

при $t_H < t < \theta$

$$W(t) = \frac{F}{2\Omega} W_{H2}(t) \left(1 - \frac{\ln \sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi e}}{\ln \sigma_x \sqrt{2\pi e}} \right), \quad (19)$$

Таким образом, эффективность ИИС – функция точности, надежности и частотных характеристик.

При практической реализации ИИС всегда принимают $F \geq 2\Omega$.

При заданной величине эффективности (для ИИС $W(t)$) требования к точностным и надежностным характеристикам системы могут быть определены из уравнений

$$W(t) = W_3. \quad (20)$$

Необходимые величины W_3 могут быть заданы на основании требуемой точности системы управления.

Таким образом, при эксплуатации ИИС необходимо определить требования к ее точности σ_ε и надежности λ , обеспечивающие заданную ее эффективность.

Выражения (21) и (22) позволяют установить связь надежности и точности ИИС и произвести их выбор в соответствии с существующими техническими возможностями. Если возможные значения надежности ограничены, то требуемая эффективность ИИС обеспечивается выбором соответствующей величины точности σ_ε .

При $0 < t < t_H$

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \exp \left\{ \ln \sigma_X \sqrt{2\pi e} \left[1 - \frac{W_3 \lambda t}{1 - e^{-\lambda t}} \right] \right\}, \quad (21)$$

При $t_H < t < \theta$

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \exp \left\{ \ln \sigma_X \sqrt{2\pi e} \left[1 - \frac{W_3 2\lambda^2 t (\theta - t_H)}{(1 - e^{-\lambda t}) 2\lambda (\theta - t_H) e^{-\lambda t} [1 + \lambda(t - t_H)]} \right] \right\}. \quad (22)$$

Для определения конкретных значений σ_ε и λ системы необходимо учесть дополнительные ограничения. В качестве ограничений примем величину затрат на техническую реализуемость ИИС в виде ее стоимости C . В общем случае под «стоимостью» можно понимать любой из ограничивающих факторов (вес, габариты и т. п.).

Зависимость $C = f_2(\lambda)$ может быть представлена в виде экспоненциальной зависимости

$$C = a_3 \exp(-b_3 \sigma_\varepsilon), \quad (23)$$

где a_i – константы.

Аналогично можно принять

$$C = a_4 \exp(-b_4 \sigma_\varepsilon) \quad (24)$$

в этом случае взаимосвязь σ_ε и λ , обеспечивающая равенство стоимости от $f_1(\sigma_\varepsilon)$ и $f_2(\lambda)$ записывается в виде

$$\lambda = \frac{b_3}{b_4} \sigma_\varepsilon + \frac{1}{b_4} \ln \frac{a_4}{a_3}, \quad (25)$$

где a_i, b_i – константы в соответствии с аппроксимациями (23) и (24).

Определение искомым σ_ε и λ может быть найдено:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \left(\sigma_X \sqrt{2\pi e} \right)^{1 - \frac{W_3 \left(\frac{b_3}{b_4} \sigma_\varepsilon + \frac{1}{b_4} \ln \frac{a_4}{a_3} \right)}{1 - \exp \left[- \left(\frac{b_3}{b_4} \sigma_\varepsilon + \frac{1}{b_4} \ln \frac{a_4}{a_3} \right) t \right]}}. \quad (26)$$

Таким образом применение для оценки эффективности ИИС показателя $W(t)$ вместе с (25) позволяет связать точность, надежность, стоимость и эффективность информационно–измерительной системы, что дает возможность на этапе проектирования формализовать выбор ее технико–экономических показателей.

Определение системной точности устройства обработки информации по заданной эффективности (W) и надежности (λ)

Параметры системы:

- погрешности определения координат $\sigma = 20$;
- интенсивность отказов $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/час;
- эффективность системы $W = 0,99$;
- характеристическое время изменения определяющего параметра $\theta = 1000$ ч;
- время наблюдения за системой $t = 700$ ч.

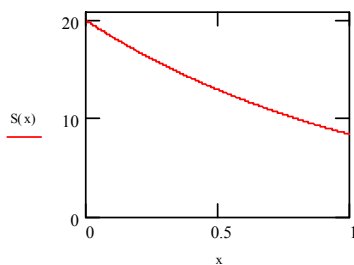


Рис.1. Зависимость системной точности σ от эффективности устройства W

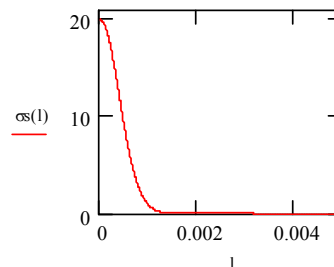


Рис.2. Зависимость системной точности σ от интенсивности отказов λ информационного устройства

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \exp \left\{ \ln \sigma_X \sqrt{2\pi e} \left[1 - \frac{W_3 2\lambda^2 t (\theta - t_H)}{(1 - e^{-\lambda t}) 2\lambda (\theta - t_H) e^{-\lambda t} [1 + \lambda (t - t_H)]} \right] \right\}.$$

Определение параметров точности и надежности информационного устройства с учетом функций их стоимости при заданной эффективности
(W)

Функция стоимости обеспечения точности информационного устройства:

$$C_1 = f_1(\sigma), \quad C_1 = a_3 \exp(-b_3 \sigma_\varepsilon).$$

Функция стоимости обеспечения надежности информационного устройства:

$$C_2 = f_2(\sigma), \quad C_2 = a_4 \exp(-b_4 \sigma_\varepsilon).$$

Параметры функции стоимости и точности:

$$a_3=1000, \quad b_3=1.$$

Параметры функции стоимости и надежности:

$$a_4=1000, \quad b_4=1.$$

Решение уравнения для определения точности с учетом определенной интенсивности отказов λ

Решение находим из равенства функций стоимости надежности и точности

$$C_1 = C_2.$$

При этом уравнение взаимосвязи σ_ε и λ :

$$\lambda = \frac{b_3}{b_4} \sigma_\varepsilon + \frac{1}{b_4} \ln \frac{a_4}{a_3},$$

$$\text{где } \sigma_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \left(\sigma_X \sqrt{2\pi e} \right)^{\frac{W_3 \left(\frac{b_3 \sigma_\varepsilon + \frac{1}{b_4} \ln \frac{a_4}{a_3}} \right)}{1 - \exp \left[- \left(\frac{b_3 \sigma_\varepsilon + \frac{1}{b_4} \ln \frac{a_4}{a_3}} \right) t \right]}}.$$

Результующие параметры

- точность устройства $\sigma_\varepsilon = 19,8$;
- надежность (интенсивность отказов) $\lambda = 1,29 * 10^{-3}$ 1/час;
- стоимость обеспечения точности и надежности C_1 и C_2

$$C_1 = 137,6, \quad C_2 = 137,6.$$

Таким образом применение для оценки эффективности ИИС показателя эффективности $W(t)$ вместе с (25) позволяет связать точность, надежность, стоимость и эффективность информационно-измерительной системы, что дает возможность на этапе проектирования формализовать выбор ее технико-экономических показателей и получить количественные критерии качества.

Литература

1. Прохоренко В.А., Смирнов А.Н. Прогнозирование качества систем, изд. “Наука и техника”, Минск, 1976.
2. Лицкевич А.П., Демьянов В.В. Прикладная теория надежности радиоэлектронного оборудования и морских информационных систем. Новорос-сийск: НГМА, 2000.
3. Лицкевич А.П. Методическое пособие по аналитическим методам и оптимизации эксплуатационных процессов сложных систем.
4. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. Энергоиздат, 1986.

5. О надежности человека-оператора в технологии регулирования ЭМО порта. / А.П. Лицкевич, О.И. Андрианов, Н.В. Карбовец. Сборник материалов Международной научной конференции «Компьютерное моделирование и информационные технологии в науке, инженерии и образовании», Пенза. РИО ПГСХА. 2003.

Обеспечение надежного функционирования портовых радиоэлектронных средств требует соблюдение требования электромагнитной совместимости (ЭМС). В свою очередь, при существующей в морских портах плотности заполнения частотного спектра передачи информации возникает необходимость создания службы контроля и регулирования электромагнитной обстановки (ЭМО) в Новороссийском регионе. Следующим важным условием (после создания такой службы контроля) является правильный подбор человека-оператора, следящего, с помощью компьютерного приемника-сканера, за ЭМО. От его профессиональной подготовленности и психологического состояния зависит удовлетворительное совместное функционирование всех радиосредств в регионе.

Методы определения надежности человека-оператора базируются на знании: статистических данных о процессах выполнения оператором его функций, надежности технических средств, влияния различных факторов на надежность выполнения стоящих перед системой контроля ЭМО задач, взаимного влияния оператора и техники, частот наступления тех или иных критических состояний человеко-машинной системы.

Известно, что в зависимости от характера процесса управления различают несколько видов человеко-машинных систем. Рассматриваемая нами система контроля ЭМО относится к тому виду, в котором технологический процесс протекает непрерывно. Оператор наблюдает за процессом в течение времени $\Delta t_{набл}$ и вмешивается в него только в случае отклонения процесса от нормы на интервале $\Delta t_{откл}$ (в нашем случае, когда нарушается ЭМО). Процесс управления в системах, в которых $\Delta t_{набл} \gg \Delta t_{откл}$ можно считать носящим непрерывный характер.

Показателем надежности для рассматриваемой человеко-машинной системы,

следящей за ЭМО региона, является вероятность безотказного, безошибочного и своевременного протекания управляемого процесса в течение заданного времени t . Такое протекание процесса возможно в следующих случаях:

1) средства обнаружения радиоизлучателей (сканеры, компьютерная техника, программное обеспечение, средства реагирования и связи и т.п. работают исправно;

2) произошел отказ элемента средства обнаружения, но при этом:

– оператор безошибочно и своевременно выполнил требуемые действия по ликвидации аварийной обстановки;

– оператор допустил ошибочные действия, но своевременно их исправил.

Надежность комплекса «человек - машина» запишем в следующем виде:

$$P_{ч.м} = P_m(t) + [1 - P_m(t)]K_{on}[P_{on}P_{св} + (1 - P_{on})P_{исп}], \quad (1)$$

где $P_m(t)$ – вероятность безотказной работы технических устройств; K_{on} – коэффициент готовности оператора; P_{on} – вероятность безошибочной работы оператора по выполнению задачи ликвидации аварийной ситуации; $P_{св}$ – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий; $P_{исп}$ – вероятность исправления ошибочных действий.

В предположении устойчивой работы оператора справедливо использовать пуассоновский характер потока ошибок; тогда вероятность безошибочного выполнения работы можно определить так:

$$P_{on} = e^{-\sum_{j=1}^r \lambda_j \tau_j k_j}, \quad (2)$$

$$\lambda_j = \frac{n_j}{N_j T_j}, \quad (3)$$

где λ_j – интенсивность ошибок j -го вида; N_j и n_j – соответственно общее количество выполненных операций j -го вида и допущенное при этом количество ошибок; T_j – среднее время выполнения операции, j -го вида; k_j – количество выполненных операций j -го типа; r – количество всех операций; τ_j – время выполнения той операции.

Введем ещё два показателя: *восстанавливаемость системы* и *своевре-*

менность действий оператора. Показатель восстанавливаемости, обусловлен возможностью самоконтроля оператором своих действий и исправления допущенных ошибок. Основным показателем восстанавливаемости является вероятность исправления допущенной ошибки, которую можно определить по формуле:

$$P_{исп} = P_{\kappa} P_{обн} P_{н}, \quad (4)$$

где P_{κ} – вероятность выдачи сигнала схемой контроля, учитывающая безотказность системы контроля и степень её участия в контроле действий оператора, т.е. относительное количество контролируемых действий; $P_{обн}$ – вероятность обнаружения оператором сигнала контроля; $P_{н}$ – вероятность исправления ошибочных действий при повторном решении задачи.

Показатель *своевременности* деятельности оператора актуален в связи с тем, что правильные, но несвоевременные действия не всегда приводят к достижению цели, т.е. часто дают тот же результат, что и совершенная ошибка. Поэтому, как правило, на выполнение определенных задач в системе «человек-машина» отводится определенный лимит времени $t_{л}$, превышение которого рассматривается как ошибка.

С учётом сказанного параметр «своевременность» является важнейшим показателем надежности человека-оператора является своевременность, т.е. вероятность выполнения задачи в течение времени $\tau_{он} < t_{л}$. Эта вероятность

$$P_{св} = P\{\tau_{он} < t_{л}\} = \int_0^{t_{л}} f(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $f(\tau)$ – функция распределения времени решения задачи оператором.

$$P_{св} = 0,5 + \Phi_0\left(\frac{\bar{t}_{л} - \bar{\tau}_{он}}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_{он}^2}}\right). \quad (6)$$

Время $t_{л}$ может быть как постоянной, так и случайной величиной. В первом случае вероятность $P_{св}$ определяется выражением (5).

Таким образом, используя полученные соотношения для надежности человека-оператора, можно определить общую надежность системы обеспечения электромагнитной совместимости в рассматриваемом регионе. Предполагается

апробирование этой методики на задачах оценки ЭМО в Новороссийском морском регионе.

Литература

1. Душков Б.А., Смирнов Б.А., Терехов В.А. Инженерно-психологические основы конструкторской деятельности. – М: Высшая школа, 1990.
2. Смирнов Б.А. Инженерно-психологическая оценка деятельности оператора в автоматизированных системах массового обслуживания // Эргономическое обеспечение автоматизированных систем. Минск, 1983.

6. Оценка вероятности безотказной работы системы регулирования ЭМО в порту с учетом надежности человека-оператора / А.П. Лицкевич, О.И. Андрианов, Н.В. Карбовец. Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 8. Новороссийск. РИО НГМА. 2003.

Обеспечение надежного функционирования портовых радиоэлектронных средств требует соблюдения требования электромагнитной совместимости (ЭМС). В свою очередь, при существующей в морских портах плотности заполнения частотного спектра информационных радиоканалов назрела необходимость активного воздействия на электромагнитную обстановку с целью создания условий электромагнитной совместимости для всех или по крайней мере большинства радиоэлектронных средств данного района. Решение задачи видится в создании локальной системы (службы) коллективной защиты РЭС (ЛСКЗ) в Новороссийском регионе.

Важным условием (после создания такой системы защиты) является правильный подбор человека-оператора ЛСКЗ, следящего, с помощью компьютерного сканирующего комплекса за ЭМО. От его профессиональной подготовленности и психологического состояния зависит качество коллективного функционирования всех радиосредств и, в конечном счёте, ЭМО региона.

Методы определения надежности человека-оператора базируются на знании: статистических данных о процессах выполнения оператором своих функций, надежности технических средств, влияния различных факторов на надежность выполнения стоящих перед системой контроля ЭМО задач, взаимного влияния оператора и техники, периодичности наступления тех или иных критических состояний человеко-машинной системы [1].

В случае непрерывности технологического процесса показателем надежности человеко-машинной системы, следящей за ЭМО региона, является вероятность безотказного, безошибочного протекания управляемого процесса контроля ЭМО, своевременность которого задана началом и продолжительностью времени Δt . Это возможно в следующих случаях:

1) средства обнаружения радиоизлучателей (сканеры, компьютерная техника, программное обеспечение, средства связи и т.п.) работают исправно;

2) оператор безошибочно и своевременно устранил отказ элемента средства обнаружения;

3) оператор исправил свои ошибочные действия.

Надежность системы коллективной защиты запишем в предположении независимости характеристик действия оператора и обслуживаемых им технических средств:

$$P_{ч-м}(t) = P_T(t) + [1 - P_T(t)] \cdot K_{оп} \cdot [P_{оп}P_{св} + (1 - P_{оп})P_{исп}], \quad (1)$$

где $P_T(t)$ – вероятность безотказной работы технических устройств; $K_{оп}$ – коэффициент готовности оператора; $P_{оп}$ – вероятность безошибочной работы оператора при ликвидации аварийной ситуации; $P_{св}$ – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий; $P_{исп}$ – вероятность исправления своих ошибочных действий.

В случае стационарных условий работы оператора и простейшего потока событий справедливо использовать пуассоновский закон распределения вероятностей. Тогда вероятность безошибочного выполнения работы можно определить по формуле:

$$P_{оп} = e^{-\sum_{j=1}^r \lambda_j \tau_j k_j}, \quad (2)$$

$$\lambda_j = \frac{n_j}{N_j T_j}, \quad (3)$$

где λ_j – интенсивность ошибок j -го вида; N_j и n_j – соответственно общее количество выполненных операций j -го вида и допущенное при этом количество ошибок; T_j – среднее время выполнения операции, j -го вида; k_j – количество выполненных операций j -го типа; r – количество всех операций; τ_j – время выполнения j -той операции.

Для более полной характеристики надежности оператора следует ввести ещё два показателя: *восстанавливаемость* и *своевременность действий оператора*. Показатель восстанавливаемости, обусловлен возможностью самоконтроля

оператором своих действий и исправления допущенных ошибок. Основным показателем восстанавливаемости является вероятность исправления $P_{ИСП}$ допущенной ошибки, которую можно определить по формуле:

$$P_{ИСП} = P_K P_{ОБН} P_H, \quad (4)$$

где P_K – вероятность выдачи сигнала схемой контроля, действующей в сравнении с оператором безотказно; $P_{ОБН}$ – вероятность обнаружения оператором сигнала контроля; P_H – вероятность исправления ошибочных действий при повторном решении задачи.

Показатель *своевременности* деятельности оператора актуален в связи с тем, что правильные, но несвоевременные действия не всегда приводят к достижению цели, т.е. часто дают тот же результат, что и совершенная ошибка. Поэтому, как правило, на выполнение определенных задач в системе «человек-машина» отводится определенный лимит времени t_L , превышение которого рассматривается как ошибка.

С учётом сказанного параметр “своевременность” является важнейшим показателем надежности дежурного оператора. Вероятность выполнения задачи в течение времени $\tau_{ОП} < t_L$ может быть вычислена [2]:

$$P_{СВ} = P\{\tau_{ОП} < t_L\} = \int_0^{t_L} f(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $f(\tau)$ – функция распределения времён решения задач, связанных с защитой РЭС оператором от нарушений ЭМС.

$$P_{СВ} = 0,5 + \Phi\left(\frac{\overline{t_L} - \overline{\tau_{ОП}}}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_{ОП}^2}}\right). \quad (6)$$

Время t_L может быть как постоянной, так и случайной величиной. В первом случае вероятность $P_{СВ}$ определяется выражением (5).

Используя полученные соотношения для расчёта надежности дежурного оператора по защите РЭС, определим общую надежность системы по формуле (1). Примем для расчета рассматриваемой системы следующие значения эксплуатационных параметров (данные для расчета возьмем из [3]). Вероятность безотказной работы технических устройств $P_T(t)$ определим по формуле:

$$P_T(t) = e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Коэффициент готовности оператора $K_{ОП}$ примем равным 0,9. Вероятность безошибочной работы оператора при ликвидации аварийной ситуации $P_{ОП}$ определим по формуле (2), где $\lambda = 4,46 \cdot 10^{-2} \text{ час}^{-1}$, $\tau = 8$, $k = 1$. Вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий $P_{СВ}$ определим по формуле (6), где $t = 4 \div 6 \text{ мин}$, $\tau_{ОП} = 2 \div 3 \text{ мин}$, $\sigma_t = 0,0166$, $\sigma_{ОП} = 0,01$. Вероятность исправления своих ошибочных действий $P_{ИСП}$ определим по формуле (4), где $P_K = 0,999$, $P_{ОБН} = 0,99$, $P_H = 0,99$.

$$t1 := 0..10000 \quad \lambda1 := 2 \cdot 10^{-4}$$

$$P1(t1) := e^{-\lambda1 \cdot t1}$$

Таблица 1

$t1,$ час	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$P1(t)$	1	0,8187 3	0,6703 2	0,5488 1	0,449 3	0,3678 8	0,301 2	0,246 6	0,201 9	0,165 3	0,135 3

В таблице 1 приведены значения вероятности безотказной работы технических устройств $P_T(t)$ от времени.

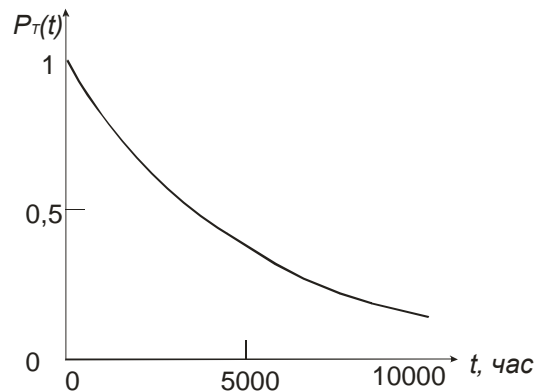


Рис.1. Зависимость вероятности безотказной работы технических устройств $P_T(t)$ от времени.

$$t2 := 8 \quad k := 1 \quad \lambda2 := 4.46 \cdot 10^{-2}$$

$$P2 := e^{-\lambda2 \cdot t2 \cdot k} \quad P2 = \blacksquare$$

$$t3 := 0.083 \quad \tau := 0.05 \quad \sigma1 := 0.0166 \quad \sigma2 := 0.01$$

$$P3 := 0.5 + 0.5 \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{2} \cdot (t3 - \tau)}{2 \cdot \sqrt{\sigma1^2 + \sigma2^2}} \right] \quad P3 = \blacksquare$$

$$P5 := 0.999 \quad P6 := 0.99 \quad P7 := 0.99$$

$$P4 := P5 \cdot P6 \cdot P7 \quad P4 = \blacksquare$$

$$K := 0.9$$

$$P(t) := P1(t) + (1 - P1(t)) \cdot K \cdot [P2 \cdot P3 + (1 - P2) \cdot P4]$$

$$t := 0, 1000 \dots 10000$$

Таблица 2

$t1,$ час	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$P(t)$	1	0,9757	0,9559	0,9397	0,926	0,915	0,906	0,899	0,893	0,888	0,884

В таблице 2 приведены значения вероятности безотказной работы системы коллективной защиты РЭС с учетом человеческого фактора $P_{ч-м}(t)$ от времени.

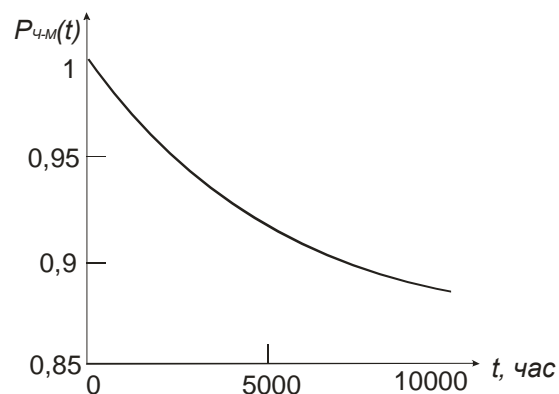


Рис.2. Временная зависимость вероятности безотказной работы системы коллективной защиты РЭС с учетом человеческого фактора $P_{ч-м}(t)$.

Зависимость $P_{ч-м}(t)$, приведенная на рис.2. показывает, что надежность системы коллективной защиты РЭС существенным образом зависит от надежности человека, что заставляет более подробно рассмотреть модель состояний человека-оператора и определить факторы, от которых они зависят.

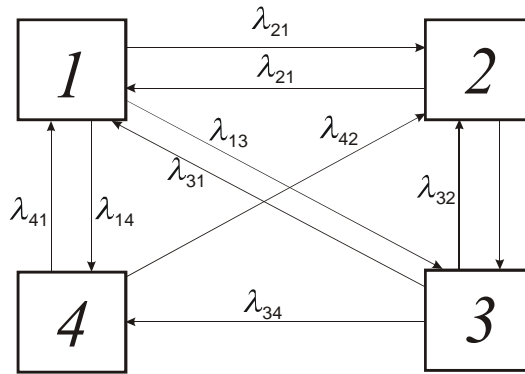


Рис.3. Граф состояний динамики изменения состояний ЛСКЗ в процессе ее взаимодействия с дежурным оператором:

- 1 – рабочее состояние дежурного оператора;
- 2 – контроль действий дежурного оператора его руководителем;
- 3 – выдача рекомендаций дежурному оператору;
- 4 – восстановление дежурного оператора (под восстановлением понимается временный выход основного дежурного оператора из работы системы и включение в работу резервного оператора из группы восстановления).

Оценки экспертов и опыт эксплуатации морских систем показывают, что поведение дежурного оператора ЛСКЗ аналогично поведению операторов других морских информационных систем. Примем за основу модель состояний оператора системы управления движением судов. Эта модель описывается марковским процессом со следующим графом состояний (рис.3).

В соответствии с приведенным выше графом состояний, используя правило Колмогорова, получим систему дифференциальных уравнений. В этом случае процесс изменения состояний системы имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1 - \lambda_{13}P_1 - \lambda_{14}P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 + \lambda_{41}P_4; \\ \frac{dP_2}{dt} = -\lambda_{21}P_2 - \lambda_{23}P_2 + \lambda_{12}P_1 + \lambda_{32}P_3 + \lambda_{42}P_4; \\ \frac{dP_3}{dt} = -\lambda_{31}P_3 - \lambda_{32}P_3 - \lambda_{34}P_3 + \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2; \\ \frac{dP_4}{dt} = -\lambda_{41}P_4 - \lambda_{42}P_4 + \lambda_{14}P_1 + \lambda_{34}P_3; \end{cases} \quad (8)$$

при условии $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$ и следующих начальных условиях:

$$P_1(0) = 1; \quad P_2(0) = 0; \quad P_3(0) = 0; \quad P_4(0) = 0.$$

Здесь λ_{ij} – интенсивность перехода системы из состояния i , в состояние j .

В стационарном режиме функционирования системы производные в левых частях уравнений приравниваются к нулю. При этом условии система уравнений

(8) записывается уже как система алгебраических уравнений, т.е.

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_{12}P_1 - \lambda_{13}P_1 - \lambda_{14}P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 + \lambda_{41}P_4; \\ 0 = -\lambda_{21}P_2 - \lambda_{23}P_2 + \lambda_{12}P_1 + \lambda_{32}P_3 + \lambda_{42}P_4; \\ 0 = -\lambda_{31}P_3 - \lambda_{32}P_3 - \lambda_{34}P_3 + \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2; \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1. \end{cases} \quad (9)$$

Примем в качестве экспертных оценок из [11] значения интенсивностей переходов, по известным значениям для операторов СУДС равными:

$$\begin{aligned} \lambda_{12} &= 50 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{13} = 0.1 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{14} = 20 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{21} &= 5 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{23} = 3.8 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{31} &= 0.1 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{32} = 3.8 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{34} = 0.1 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{41} &= 0.01 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{42} = 2 \text{ ч}^{-1}. \end{aligned}$$

Решив систему алгебраических уравнений (9) получим стационарные значения вероятностей соответствующих состояний для любого момента времени, что совпадает с решениями системы уравнений (8) при $t \rightarrow \infty$.

Результат решения задачи показывает, что общая надежность системы с учетом состояний дежурного оператора составляет $P=0,99$. Таким образом, вероятность безотказной работы существенно повышается за счет резервирования оператора и введения состояний, которые соответствуют в теории надежности восстанавливаемости систем.

Таким образом, показано, что надёжность системы "оператор-РЭС", обеспечивающей технический контроль ЭМО, существенно зависит от надёжности выполнения правильных действий оператором, являющимся в системе "слабым" звеном. Это подтверждается расчётом, согласно которому резервирование "слабого" звена (т.е. оператора) существенно повышает вероятность безотказной работы за счёт самовосстанавливаемости системы.

Литературы

1. Душков Б.А., Смирнов Б.А., Терехов В.А. Инженерно-психологические основы конструкторской деятельности. – М.: "Высшая школа", 1990.
2. Смирнов Б.А. Инженерно-психологическая оценка деятельности оператора в автоматизированных системах массового обслуживания // Эргономическое обеспечение автоматизированных систем. – Минск, 1983.
3. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. – Л.: "Наука", 1982. –289 с.

7. Прогнозирование вероятности возникновения критической ситуации в эргатической системе на примере швартуемого судна / Н.В. Карбовец, В.В. Демьянов. Сборник научных трудов НГМА. Выпуск 9. Новороссийск. РИО НГМА. 2004.

При эксплуатации морского флота важнейшей задачей является обеспечение безопасности мореплавания. Мореплавание является сферой деятельности человека, связанной с риском, с возможностью аварий и гибели людей. Статистика в области транспортной безопасности показывает, что основной причиной большинства аварий и катастроф на морском транспорте является человеческий фактор (около 70–80% аварийных случаев вызвано неправильными действиями человека) – прежде всего это ошибки судоводителей, лоцманов, операторов.

Для осуществления морских операций при входе и выходе судна из порта и снижения риска возникновения аварий в порту существуют радиоэлектронные системы дифференциальной спутниковой навигации, комплексируемые с морскими портовыми АИС. Для предотвращения опасных ситуаций при швартовке существует также лазерная система швартовки (в Новороссийске такая система находится у причалов нефтетерминалов "Шесхарис"), предназначенная для снижения отрицательного влияния человеческого фактора при выполнении операций швартовки морских судов.

Особенно сложной и опасной ситуацией на морском транспорте является процесс швартовки судна к причалу, требующий точности определения местоположения судна, а также точности, своевременности и правильности действий лоцмана, управляющего этим процессом. Возникающие опасности связаны, прежде всего, с тем, что процесс швартовки происходит в стесненных условиях, а также при малой управляемости швартуемого судна. Специфика швартовочных операций состоит также в том, что лоцман, управляющий процессом швартовки, непрерывно следит за быстро меняющейся ситуацией, обрабатывает большое количество информационных параметров, а также выполняет действия по швартовке судна. Таким образом, ошибки, возникающие вследствие

неправильно выполненных лоцманом действий или принятых решений, часто служат причинами навалов судна на причал, которые приводят к повреждениям, как судна, так и берегового оборудования [1].

В предлагаемой работе процесс швартовки и возможные аварийные ситуации рассматриваются с позиций сценарного описания состояний эргатической системы, образуемой человеком-оператором (лоцманом) и швартуемым судном.

Важнейшим аспектом рассматриваемой операции, как уже было сказано выше, является обеспечение ее безопасности, т.е. предотвращения навалов судна на береговое оборудование. Наиболее эффективным способом избежания аварийного исхода является использование всей имеющейся информации у лоцмана для прогнозирования изменения сценария швартовки и его своевременной корректировки.

Основным элементом предлагаемой количественной модели является составление сценария опасного состояния и выявление основных его структурных составляющих. В первую очередь, модель содержит основное, головное, событие, называемое фокусом, которое интерпретируется как аварийная ситуация. Модель также содержит цепь причинно-взаимосвязанных событий, которые предшествуют головному результирующему событию. К таким событиям относятся отказы технических средств, ошибки операторов, дестабилизирующие внешние факторы.

Сценарная модель в своем составе содержит логические связи между переменными, интерпретируемыми как события-предпосылки, ведущие к аварийной ситуации. Модель строится по определенной схеме, имеющей направление от головного события к указанным событиям-предпосылкам. При этом важно отметить их причинную взаимосвязь с рассматриваемым головным событием.

При анализе факторов и событий в проектируемом сценарии, ведущем к возникновению аварийной ситуации при швартовке необходимо учитывать и уникальность каждой сценарной ситуации, в частности малоуправляемость судна, человеческий фактор и присущие человеку-оператору психофизиологи-

ческие особенности, а также накопленный опыт вывода системы из критической ситуации.

Возможный сценарий опасного состояния, столкновения судна с причалом приведен на рис. 1. Перечень инициирующих событий, которые являются предпосылками возникновения аварийной ситуации и вероятности их возникновения, полученные на основе экспертных оценок, приведен в таблице 1.

Таблица 1

Инициирующее событие, X	Описание инициирующего события	Вероятность возникновения инициирующего события, P
$X1$	Механическая неисправность подруливающего механизма	$1,2 \cdot 10^{-5}$
$X2$	Отказ подруливающей лопасти	$5 \cdot 10^{-5}$
$X3$	Отказ АИС	$6 \cdot 10^{-6}$
$X4$	Отказ табло лазерной системы швартовки	$7 \cdot 10^{-6}$
$X5$	Отказ радиосвязи лоцмана с другими службами	$5 \cdot 10^{-4}$
$X6$	Недостаточно квалифицированный лоцман	$5 \cdot 10^{-6}$
$X7$	Неправильная оценка лоцманом поступающей информации	$5 \cdot 10^{-5}$
$X8$	Лоцман отвлекся на постороннюю информацию	$1 \cdot 10^{-2}$
$X9$	Несвоевременные действия лоцмана	$5 \cdot 10^{-3}$
$X10$	Отказ табло лазерной системы швартовки	$7 \cdot 10^{-6}$
$X11$	Неточные показания табло лазерной системы швартовки	$3 \cdot 10^{-5}$
$X12$	Неправильные действия буксира 1	$2 \cdot 10^{-3}$
$X13$	Неправильные действия буксира 2	$2 \cdot 10^{-3}$
$X14$	Принятие лоцманом неправильного решения	$5 \cdot 10^{-3}$
$X15$	Неблагоприятные метеословия (ветер, волнение моря)	$6 \cdot 10^{-4}$
$X16$	Стесненная акватория	$8 \cdot 10^{-4}$

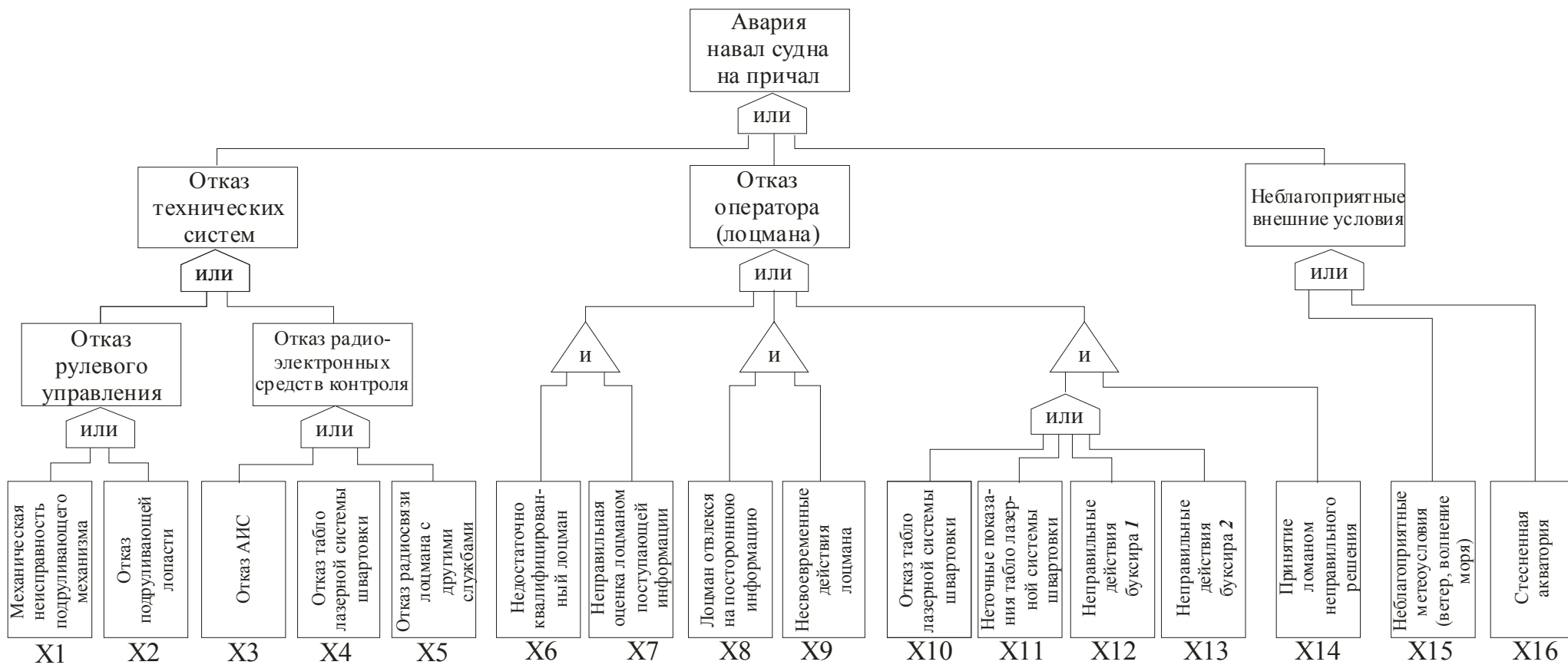
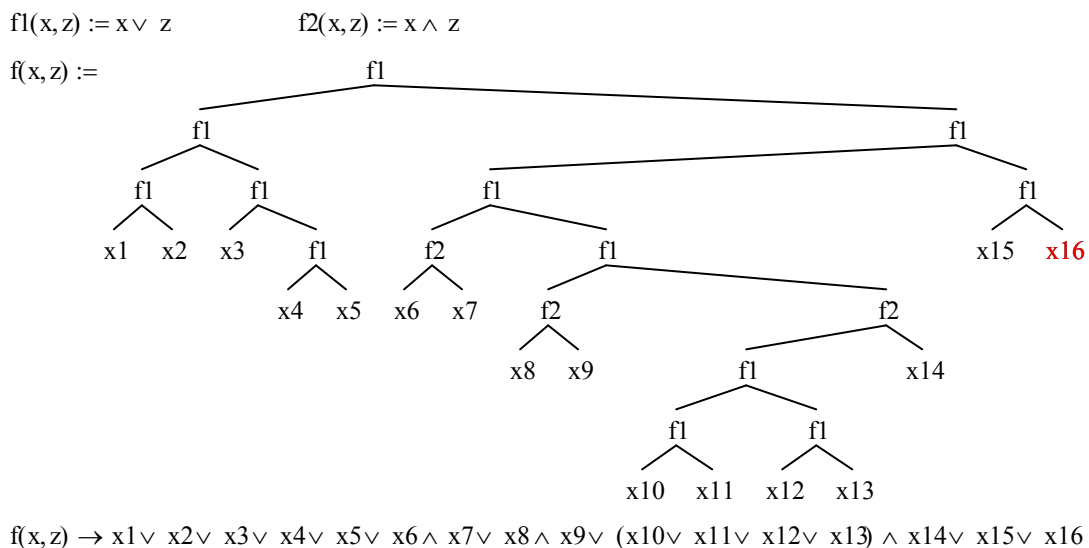


Рис. 1 Сценарий опасного состояния (навала судна на причал).

На основе приведенного, на рис.1 сценария опасного состояния составляем логическую функцию, связывающую состояние элементов с состоянием системы:



Таким образом, функцию опасного состояния (ФОС) запишем в виде логической функции непосредственно по составленному сценарию опасного состояния:

$$f(x1, x2, \dots, x16) = x1 \vee x2 \vee x3 \vee x4 \vee x5 \vee x6x7 \vee x8x9 \vee (x10 \vee x11 \vee x12 \vee x13)x14 \vee x15 \vee 16 \quad (2)$$

Перепишем это выражение в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ):

$$f(x1, x2, \dots, x16) = x1 \vee x2 \vee x3 \vee x4 \vee x5 \vee x6x7 \vee x8x9 \vee x10x14 \vee x11x14 \vee x12x14 \vee x13x14 \vee x15 \vee 16 \quad (3)$$

Теперь, после составления ФОС можно определить вероятность возникновения опасной ситуации (навала судна на причал). Для этого необходимо преобразовать ФОС в ортогональную дизъюнктивную нормальную форму (ОДНФ) [2].

Функция $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, представленная в ДНФ в виде

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = \bigvee_{i=1}^n K_i (i \leq 2^m), \quad (4)$$

эквивалентна функции

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = K_1 \vee K_1' K_2 \vee K_1' K_2' K_3 \vee \dots \vee K_1' K_2' \vee \dots \vee K_{n-1}' K_n. \quad (5)$$

В матричной форме уравнение (5) будет иметь следующий вид [2]:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ \vdots \\ K_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_1'K_2 \\ K_1'K_2'K_3 \\ \vdots \\ K_1'K_2'K_3'K_4' \dots K_{m-1}'K_m \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Выполнив преобразования, получим ФОС (3) в ОДНФ, приведенную в матричном виде:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_{16}) = \begin{vmatrix} \overline{x1} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \ \overline{x6x7} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \ \overline{x6x7} \ \overline{x8x9} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \ \overline{x6x7} \ \overline{x8x9} \ \overline{x10x14} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \ \overline{x6x7} \ \overline{x8x9} \ \overline{x10x14} \ \overline{x11x14} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \ \overline{x6x7} \ \overline{x8x9} \ \overline{x10x14} \ \overline{x11x14} \ \overline{x12x14} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \ \overline{x6x7} \ \overline{x8x9} \ \overline{x10x14} \ \overline{x11x14} \ \overline{x12x14} \ \overline{x13x14} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \ \overline{x6x7} \ \overline{x8x9} \ \overline{x10x14} \ \overline{x11x14} \ \overline{x12x14} \ \overline{x13x14} \ \overline{x15} \\ \overline{x1} \ \overline{x2} \ \overline{x3} \ \overline{x4} \ \overline{x5} \ \overline{x6x7} \ \overline{x8x9} \ \overline{x10x14} \ \overline{x11x14} \ \overline{x12x14} \ \overline{x13x14} \ \overline{x15} \ \overline{x16} \end{vmatrix} \quad (7)$$

Преобразуем теперь полученную функцию к вероятностной функции и определим вероятность возникновения исследуемого происшествия – навала судна на причал.

$$P := \begin{vmatrix} n \leftarrow 12 \\ p \leftarrow (1.2 \cdot 10^{-5} \ 5 \cdot 10^{-5} \ 6 \cdot 10^{-6} \ 7 \cdot 10^{-6} \ 5 \cdot 10^{-4} \ 5 \cdot 10^{-6} \ 5 \cdot 10^{-5} \ 3.5 \cdot 10^{-8} \ 1.5 \cdot 10^{-7} \ 1 \cdot 10^{-5} \ 1 \cdot 10^{-5} \ 6 \cdot 10^{-4} \ 8 \cdot 10^{-4})^T \\ P \leftarrow p_1 + \sum_{i=1}^n p_{i+1} \cdot \prod_{j=2}^{i+1} (1 - p_{j-1}) \end{vmatrix}$$

$$P = 0.002049$$

Результаты проведенных вычислений показывают, что вероятность возникновения навала на причал равна $P = 2.049 \cdot 10^{-3}$. Полученный результат показывает, что вероятность возникновения критической ситуации в рассматриваемой эргатической системе составляет незначительную величину в том случае, если будут обеспечены необходимые величины надежности составляющих систему элементов.

Из приведенного анализа модели швартовки судна следует необходимость повышения надежности технических средств и надежности человека-оператора, который оказывает наибольшее влияние на возникновение аварийной ситуации. В соответствии с приведенными данными существенную роль в обеспечении безаварийной швартовки играют такие элементы как: системы АИС, системы радиосвязи, опыт лоцмана, лазерная система швартовки, внешние метеорологические условия. Обеспечение высокой надежности этих систем в процессе швартовки является гарантией ее безаварийности.

Литература

1. Зараковский Г.М., Павлов В.В. Закономерности функционирования эргатических систем. М.: Радио и связь, 1987. – 267 с.
2. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 246 с.: ил.

8. Некоторые аспекты вероятностного анализа деятельности операторов береговых систем управления движением судов / Н.В. Карбовец, О.И. Андрианов. Известия высших учебных заведений (Северо-Кавказский регион) «Проблемы водного транспорта». Ч.1. Ростов-на-Дону. РГУ. 2004.

Анализ аварийности в мире показывает, что каждый год 10–15% судов мирового морского флота терпят аварии. Как правило, последствия аварий значительны. В частности, аварии приводят

- к человеческим жертвам,
- значительным убыткам,
- загрязнению окружающей среды.

При всем многообразии причин возникновения аварий, как показывает статистика, существенное значение имеет человеческий фактор (известно, что порядка 80% аварийных ситуаций вызвано неправильными действиями человека).

В надежности морских управляющих систем большую роль играет оператор, который является главным ее звеном. Именно он ставит цели перед системой, планирует, направляет и контролирует весь процесс ее работы. От его действий зависит эффективность работы всей системы. Для успешного функционирования системы от оператора требуется точность действий, быстрота и правильность принятия решений в конкретных ситуациях управления. При этом особое значение имеет правильность действий оператора в нестандартных, критических ситуациях, поскольку ошибки оператора ведут к нарушению работы системы, а нередко к аварийным и катастрофическим ситуациям.

Особую роль на флоте играет система управления движением судов (СУДС). Оператор СУДС следит за обстановкой в акватории порта, отображаемой на экране монитора и одной из важнейших его функций является прогнозирование возможных ситуаций при движении судов, для выдачи правильных своевременных рекомендаций. Деятельность оператора протекает в особых условиях, которые предъявляют к нему повышенные требования (например, на-

личие факторов риска, дефицита времени на выполнение требуемых действий, возникновения аварийных ситуаций, наличие потенциальных угроз, недостатка одного типа информации и переизбытка другого типа информации и др.). Такая напряженная работа оператора СУДС, возлагаемые на него нагрузки, а также его индивидуальное физиологическое состояние могут явиться причиной возникновения ошибок в его действиях.

Для анализа работы оператора с целью ее оптимизации необходим системный подход, т.е. оператора и его действия необходимо анализировать во взаимодействии со средой и системой, т.к. человеку свойственна высокая чувствительность, реактивность, присущи свои психофизиологические особенности, он подвержен влиянию множества факторов внешней и внутренней среды. Рассмотрение таких систем с позиций системного подхода получило название эргатических систем.

Для эргатических систем также определяют понятие надежности. Под надежностью человека-оператора в эргатических системах понимается его способность в течение заданного интервала времени в предусмотренных условиях сохранять нормальное состояние жизнедеятельности и выдерживать технические параметры управления системы в установленных пределах, а также выполнять все возложенные на него функции по поддержанию заданного режима работы управляемой техники [1].

Рассмотрению вопросов надежности человека-оператора посвящены работы Котика М.А., Зараковского Г.М., Крылова В.М., Душкова Б.А., Ломова Б.Ф., Губинского А.И., Стрелкова Ю. К. и др.

Рассматривая работу оператора СУДС, следует количественно оценить его надежность параметры. В этом случае, количественно надежность оператора характеризуется показателями безошибочности, готовности, восстанавливаемости и своевременности. Основным показателем безошибочности является вероятность безошибочной работы, которая определяется формулой [2]:

$$P_{оп} = e^{-\sum_{j=1}^r \lambda_j \tau_j k_j}, \quad (1)$$

$$\lambda_j = \frac{n_j}{N_j T_j}, \quad (2)$$

где λ_j – интенсивность ошибок j -го вида; N_j и n_j – соответственно общее количество выполненных операций j -го вида и допущенное при этом количество ошибок; T_j – среднее время выполнения операции, j -го вида; k_j – количество выполненных операций j -го типа; r – количество всех операций; τ_j – время выполнения j -той операции.

Готовность оператора СУДС, как и в теории надежности технических систем характеризует свойство оператора быть в готовности в любой произвольный момент времени. Показателем готовности является коэффициент готовности оператора $K_{ОП}$, представляющий собой вероятность включения оператора в работу в момент времени t .

Показатели восстанавливаемости характеризуются возможностью исправления оператором допущенных ошибок. Показателем восстанавливаемости является вероятность исправления им допущенной ошибки $P_{ИСП}$, которую можно определить по формуле:

$$P_{ИСП} = P_K P_{ОБН} P_H, \quad (3)$$

где P_K – вероятность выдачи сигнала схемой контроля, действующей в сравнении с оператором безотказно; $P_{ОБН}$ – вероятность обнаружения оператором сигнала контроля; P_H – вероятность исправления ошибочных действий при повторном решении задачи.

Важным параметром оператора СУДС, как отмечалось выше, является показатель своевременности. Основным показателем своевременности является вероятность выполнения задачи в течение заданного времени $P_{СВ}$.

Вероятность выполнения задачи в течение времени $\tau_{ОП} < t_{Л}$ может быть вычислена [2]:

$$P_{СВ} = P\{\tau_{ОП} < t_{Л}\} = \int_0^{t_{Л}} f(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $f(\tau)$ – функция распределения времён решения задач, связанных с управлением судами, находящимися в порту и выдачи им каких-либо указаний.

$$P_{CB} = 0,5 + \Phi \left(\frac{\overline{t_L} - \overline{\tau_{OP}}}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_{OP}^2}} \right), \quad (5)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа;

τ_{OP} – время выполнения задачи;

t_L – лимит времени, отведенный на принятие решения и выполнения необходимых действий, превышение которого может рассматриваться как ошибочное действие оператора;

σ_t – среднеквадратическое отклонение лимита времени;

σ_{OP} – среднеквадратическое отклонение времени выполнения оператором задачи.

Поскольку СУДС работает непрерывно и круглосуточно, то показателем ее надежности, является вероятность безотказного, безошибочного протекания процесса контроля обстановки в акватории порта. Такое протекание процесса возможно в следующих случаях:

- 1) технические средства (компьютерная техника, программное обеспечение, средства связи и т.п.) работают исправно;
- 2) оператор безошибочно и своевременно выполнил действия по устранению возникновения аварийной ситуации;
- 3) оператор своевременно исправил свои ошибочные действия.

Надежность рассматриваемой эргатической системы СУДС с учетом независимости характеристик действия оператора и обслуживаемых им технических средств записывается в виде:

$$P_{ч-м}(t) = P_T(t) + [1 - P_T(t)] \cdot K_{OP} \cdot [P_{OP}P_{CB} + (1 - P_{OP})P_{ИСП}], \quad (6)$$

где $P_T(t)$ – вероятность безотказной работы технических устройств; K_{OP} – коэффициент готовности оператора; P_{OP} – вероятность безошибочной работы оператора при ликвидации аварийной ситуации; P_{CB} – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий; $P_{ИСП}$ – вероятность исправления своих ошибочных действий.

Введение количественных показателей дает основание для расчёта надеж-

ности оператора СУДС. Тогда общую надежность системы определим по формуле (6). Расчет рассматриваемой эргатической системы проведем, используя опытные значения эксплуатационных параметров (данные для расчета возьмем из [3, 5]). Вероятность безотказной работы технической части СУДС $P_T(t)$ определим по формуле:

$$P_T(t) = e^{-\lambda t}. \quad (7)$$

Используя данные [3], определим надежность всей эргатической системы:

- примем коэффициент готовности оператора $K_{ОП}$ равным 0,95;
- вероятность безошибочной работы оператора при ликвидации аварийной ситуации $P_{ОП}$ определим по формуле (1), где $\lambda = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ час}^{-1}$, $\tau = 7$, $k = 1$;
- вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий $P_{СВ}$ определим по формуле (5), где $t=4 \div 6 \text{ мин}$, $\tau_{ОП}=2 \div 3 \text{ мин}$, $\sigma_t=0,0166$, $\sigma_{ОП}=0,01$;
- вероятность исправления своих ошибочных действий $P_{ИСП}$ определим по формуле (3), где $P_K=0,998$, $P_{ОБН}=0,99$, $P_H=0,99$.

Вычисления проведем с помощью программы Mathcad.

$$\begin{array}{l}
 P(t_1, t_3) := \\
 \lambda_1 \leftarrow 1 \cdot 10^{-4} \\
 k \leftarrow 1 \\
 \lambda_2 \leftarrow 4.4 \cdot 10^{-2} \\
 t_2 \leftarrow 0.02 \\
 \tau \leftarrow 0.05 \\
 \sigma_1 \leftarrow 0.0166 \\
 \sigma_2 \leftarrow 0.01 \\
 K \leftarrow 0.9 \\
 P_1 \leftarrow e^{-\lambda_1 \cdot t_1} \\
 P_2 \leftarrow e^{-\lambda_2 \cdot t_2 \cdot k} \\
 P_3 \leftarrow 0.5 + 0.5 \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{2} \cdot (t_3 - \tau)}{2 \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \right] \\
 P_4 \leftarrow 0.998 \\
 P_5 \leftarrow 0.99 \\
 P_6 \leftarrow 0.99 \\
 P_7 \leftarrow P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \\
 P \leftarrow P_1 + (1 - P_1) \cdot K \cdot [P_2 \cdot P_3 + (1 - P_2) \cdot P_7]
 \end{array}$$

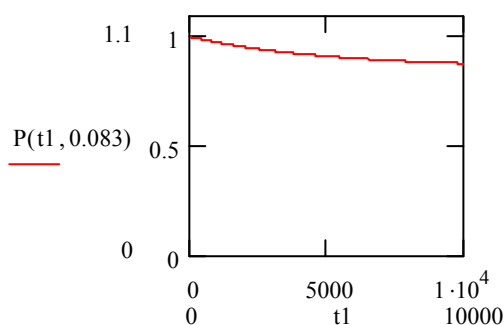


Рис. 1. Вероятность безотказной работы эргатической системы УДС.

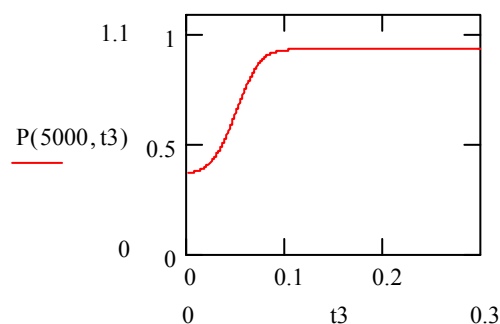


Рис. 2. Зависимости вероятности безотказной работы эргатической системы УДС от лимита времени, отведенного на принятие оператором решения и выполнения необходимых действий.

Приведенный графический материал показывает, что надёжность системы УДС, обеспечивающей контроль и управление обстановкой в акватории порта, существенно зависит от надёжности выполнения правильных и своевременных действий оператором, являющимся в системе “слабым” звеном. Из графика видно, что при малом запасе времени, отведенном на решение и выполнение оператором задачи, надёжность системы существенно снижается (до значения $P_{ч-м} = 0,38$), а при увеличении лимита времени – возрастает.

Таким образом, необходимо более подробно рассматривать человека-оператора, в частности его состояния и определить факторы, от которых они зависят, т.е. необходимо повышать его надёжность. Этого можно добиться, например, путем контроля его состояния с помощью специального контура контроля, а также путем “резервирования” оператора другим оператором и “восстановления”, в случае “отказа” первого, подобно резервированию и восстановлению технических систем, что существенно повышает вероятность безотказ-

ной работы за счёт восстанавливаемости системы.

Литература

3. Душков Б.А., Смирнов Б.А., Терехов В.А. Инженерно-психологические основы конструкторской деятельности. – М: Высшая школа, 1990.
4. Смирнов Б.А. Инженерно-психологическая оценка деятельности оператора в автоматизированных системах массового обслуживания // Эргономическое обеспечение автоматизированных систем. Минск, 1983.
5. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. – Л.: "Наука", 1982. –289 с.
6. Практикум по инженерной психологии и эргономике: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Сергиенко С.К., Бодров В.А., Писаренко Ю.Э. и др.; Под ред. Стрелкова Ю.К.– М.: Издательский центр «Академия», 2003.– 400с.
7. Баскин А.С., Москвин Г.И. Береговые системы управления движением судов. М.: Транспорт, 1986.– 159 с.

9. Управляемость сложных морских радиоэлектронных систем в условиях неопределенности данных / А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец. Сборник научных трудов. Выпуск 11. – Новороссийск: РИО МГА, 2006.

Современная наука располагает мощными средствами и теориями, помогающими анализировать сложные системы управления, обеспечивать их безаварийную эксплуатацию, в частности на морском флоте. К таким средствам, в первую очередь, относятся теория оптимальных статистических решений, теория дуального управления, теория инвариантности, закон необходимого разнообразия Эшби, принцип внешнего дополнения и некоторые другие. Однако существуют сложные подвижные системы и комплексы, к которым эти средства применяются с большими ограничениями или совсем не могут быть применены. Это, в первую очередь, касается сбора и анализа данных об аварийных ситуациях и катастрофических явлениях. В этих случаях мы имеем дело с очень ограниченными данными, чтобы воспользоваться всей мощностью современного математического анализа.

В статье обсуждается возможность анализа формализованными методами морских объектов, информация о которых, неполна, и содержит в себе индетерминированные компоненты, которые в кибернетике обычно представляются в виде «черных ящиков». Важность рассмотрения таких систем общеизвестна: большинство действительно сложных объектов, как, например, сложные морские радиосети и их носители, можно изобразить только в виде структурных схем, содержащих в себе ряд «черных ящиков» – частей схемы, не поддающихся детерминистическому анализу причин и следствий и, следовательно, не поддающихся математическому или другому формальному описанию [1].

Важнейшим положением, на котором базируется исследование индетерминированных объектов, состоит в том, что индетерминированный объект в оптимальном случае должен иметь в системе его управления индетерминированные элементы. Иными словами «черным ящикам» в схеме объекта должны соответствовать «черные ящики» в системе управления или распознавания. Если объект наблюдения или управления содержит в себе, как говорят, неопреде-

ленный «черный ящик», то наиболее совершенная система распознавания и управления также должна содержать в себе соответствующий по вероятностным характеристикам «черный ящик» [1]. «Черный ящик», как известно, является символом индетерминированного элемента, для которого мы не можем указать ни начальные или граничные условия движения, ни уравнений движения и даже не можем, без длительного наблюдения, указать его статистические характеристики.

Действительно, при наличии «черного ящика» в системе управления принципиально нельзя рассчитать последующее состояние системы так же, как, например, нельзя определить, на какую сторону упадет подброшенная вверх монета. Поведение индетерминированных систем можно определить только в среднем, на *большом отрезке времени*. Системы управления индетерминированными морскими объектами должны содержать в себе *модель объекта* со всеми генераторами «чистой» случайности («черный ящик»). Моделирование объекта позволяет экспериментально, в ускоренном масштабе времени выяснить, к чему приводят различные принимаемые решения и выбрать наилучшее или оптимальное из них. Первый пример такой системы описан в книге Стаффорда Бира [2].

Термин «управление при неполной информации об объекте» применяют тогда, когда вместо точных уравнений динамики объекта известны только распределения вероятностей входов и выходов, а также в случае, когда информации недостаточно для определения вероятности (например, из-за недостаточной длины выборок, данных за время наблюдения и принятия решения). При больших статистических выборках применяется последовательный анализ Вальда или другие методы теории статистических решений. При *малых выборках* мы встречаемся с проблемой «управления стихией» – индетерминированным процессом с большим удельным весом «чисто случайных» (равновероятных) событий. Малые выборки фигурируют всегда, когда определяются вероятности, близкие к «чистой» вероятности, равной $1/2$; чем ближе вероятность к $1/2$, тем длиннее должна быть выборка данных. Только очень длительный статистиче-

ский эксперимент (порядка нескольких тысяч испытаний) позволит установить такие закономерности, как «закон смены лидера» [1]. Оказалось, что смена лидера (т.е. смена знака интеграла отклонения) происходит очень редко. Эта закономерность показывает, что решения можно принимать на основании интегральных свойств объекта, так как дисперсия интеграла случайной функции в \sqrt{t} меньше дисперсии самой функции (где t – продолжительность наблюдения).

Скорость принятия решений (например, лоцманом швартуемого судна) зависит от способности управляющей системы быстро обучаться, изменять свои параметры в соответствии с изменением внешнего окружения. Говоря о человеке-операторе (лоцмане, капитане судна) следует иметь в виду, что люди, работающие в области техники, экономики, административного управления, более склонны к *детерминистическому подходу*, основанному на глубокой уверенности во всеисилии анализа причин и следствий, чем к использованию методов индетерминированного порядка. Правила управления, выработанные на сравнительно простых объектах, некритически переносятся на решение задач управления сложными индетерминированными объектами, что приводит к противоречивым результатам. Сложные объекты, как уже говорилось, требуют особого сложного управления. При помощи большого числа расчетов на машинах Л.А. Растригин показал, что утверждение о преимуществе регулярной стратегии верно только для сравнительно простых объектов: с увеличением числа измерений и при усложнении ситуации, а также при снижении точности получаемой информации преимущество получает случайный и комбинированный поиск.

Следует заметить, что Ф. Розенблатт успешно применил случайный поиск прототипов в распознающей системе типа перцептрон, являющейся примером наиболее индетерминированной, адаптивной системы, не требующей от человека почти никаких инструкций для начала своего действия. Перцептрон использовался нами и для решения задачи предсказания, указанной выше. В 60-х годах XX века из всех корифеев кибернетики только Шеннон и Стафорд Бир [2] допускали, что оптимальная стратегия может быть не только регулярной, но и

случайной. Так, в своей известной книге «Работы по теории информации и кибернетике» (ИИЛ, М., 1963, раздел «Связь при наличии шума») Шеннон пишет: «Получается, как ни странно, что наилучший результат достигается, если выбрать M функций сигнала наудачу из числа всех точек внутри сферы радиуса $\sqrt{2TW}$. Физически это соответствует тому случаю, когда в качестве функций сигнала берутся M выборок белого шума» (вторая теорема Шеннона). Публикаций показывают, что, несмотря на мнения теоретиков "детерминистов", многие инженеры применяли шум для компенсации влияния шума, т.е. выбирали случайную стратегию, потому что такая стратегия оказывалась более оптимальной, чем регулярная. Этого и следовало ожидать, так как интуиция инженера обычно всегда опережает выводы теоретических работ и часто с ними не сообразуется, как и было в данном случае. С. Бир показал [2], как можно использовать индетерминированную модель типа рулетки или игрального кубика для оптимального управления поступлением деталей на склад. Разработаны другие примеры управления самопроизвольными процессами в ряде технических устройств (самоустановление делений шкалы приборов, самоорганизация прототипов распознающих систем и др.). Нормальные уравнения Гаусса показывают, как можно объединить детерминированный и вероятностный алгоритм предсказания, а работы по самоорганизации [3] позволяют использовать для повышения точности стихийный индетерминированный механизм.

Комбинированные системы являются наиболее совершенными для сложных задач. Например, только очень простые задачи управления в экономике могут быть решены жестким планированием или только при помощи стихийного действия закона стоимости (рынка). То же можно сказать и о системах распознавания образов и предсказания будущего: в сложных задачах они должны быть детерминированно-самоорганизующимися. Определение оптимального соотношения и взаимодействия детерминированной и самоорганизующейся части (плана и стихийного вспомогательного механизма) является проблемой технической кибернетики [4].

Если объект управления или распознавания содержит в себе существенную индетерминированную (неопределимую) часть, то в соответствии с выше приведенными соображениями в системе управления должны применяться методы, пригодные для индетерминированных объектов. Индетерминированные задачи управления или распознавания можно решить двумя способами: а) применением поиска на объекте, б) применением обучающейся индетерминированной модели. Часто можно слышать, что «нельзя сформулировать и решить задачу управления до тех пор, пока мы не будем располагать математическим описанием объекта управления». Это говорит о том, что *детерминистский образ мышления* большинства людей, глубоко уверенных в том, что все может быть рассчитано и запланировано, особенно при использовании вычислительных машин, – серьезная ошибка.

Современные вычислительные машины только снижают порог, ограничивающий область, в которой невозможно детальное вычисление и планирование, но не устраняют его совершенно. Растущая сложность современной жизни быстро поглощает те преимущества, которые дают вычислительные машины. Определим «математическое описание» как формальную процедуру, позволяющую исследовать процесс в общей форме. Тогда «моделирование» – это аппарат, дающий возможность исследовать только частные случаи. По мере усложнения процессов очень скоро математическое описание их становится невозможным. Если сложность растет далее, на определенном этапе даже моделирование утрачивает свою действенность. Число элементов – это не единственная причина неопределимости системы. Имеются многочисленные генераторы «чистой» (или равновероятной) случайности и логические элементы дизъюнктивного типа («или»), которые делают невозможным сопоставление входов и выходов, причин и следствий. Кроме того, не все переменные могут быть выражены в числах. Содержание многих факторов не может быть выражено в числах, что необходимо для математического описания. Тем не менее, мы должны управлять сложными системами, не имеющими детерминированного или вероятностного математического описания и содержащими существенные неопределенности.

Что касается индетерминированных объектов, то в случае, когда мы вынуждены довольствоваться короткими выборками данных, недостаточными для определения вероятностных характеристик объекта, случайная стратегия оказывается более оптимальной по быстродействию. Если объект содержит в себе ряд «черных ящиков», то адекватные им «черные ящики» должны быть введены в схему управления или распознавания. Чем ближе характеристики черных ящиков к чистой (равновероятной) случайности, тем длиннее требуются выборки и, следовательно, тем больше оснований для такого решения, отвечающего случайной стратегии. Чем меньше у нас точных знаний об объекте, тем больше область ее применения. Примером может служить, как указывалось выше, решение Стаффорда Бира, который компенсировал «волевое» действие заводского управления последовательно включенным с ним «черным ящиком» [2].

Основной задачей теории управления современными сложными системами является нахождение на каждом уровне изучения объекта оптимального соотношения между детерминированной (разомкнутой, или планируемой) и недетерминированной частями системы. Эта задача является основной и при рассмотрении сложных систем технической кибернетики.

Рассмотрим теперь комплекс управления, включающий человека-оператора (лоцмана), управляющего швартовкой, РЭС связи и радиоэлектронные устройства лазерной системы швартовки крупнотоннажных судов (ЛСШКС), позволяющие повысить точность определения местоположение судна относительно причала. Схема такой системы приведена на рис.1. При этом, при выходе из строя ЛСШКС система сохраняет работоспособность, но к оператору (руководителю швартовки) не поступают данные о позиции судна относительно причала и он должен определять их визуально. ЛСШКС позволяет обеспечить лоцмана точной информацией о дистанции до причала и скорости сближения судна. В соответствии с этим, часть функций оператора, в частности точное определение местоположения судна относительно причала, осуществляется с помощью ЛСШКС, что позволяет отстранить оператора от ряда действий, тем самым, уменьшая количество ошибок, которые он может допустить. При этом интен-

сивность отказов оператора снижается на величину $\nu = 1.723 \cdot 10^{-3}$ *1/час*. Величина ν получена исходя из статистических данных по швартовке судов и навалам на причалы нефтегавани Шесхарис [5].

Статистические данные служб обеспечения безопасности мореплавания и стоянки судов в порту Новороссийск за 1999 – 2004 гг. о количестве проводимых швартовных операций и навалов на причалы нефтегавани Шесхарис, представлены в таблице 1.

Таблица.1. Статистические данные по швартовным операциям и навалам на причалы нефтегавани Шесхарис.

Год	Количество швартовных операций к причалам нефтегавани Шесхарис	Количество навалов на причалы нефтегавани Шесхарис
1999	498	2
2000	691	3
2001	853	6
2002	990	5
2003	1112	4
2004	1235	2

Анализ статистических данных по нефтегавани Шесхарис (табл.1.) позволяет определить вероятность совершения навала на причал нефтеналивного порта Шесхарис [5]:

$$Q_u = \frac{n}{N}, \quad (1)$$

где n – среднее число навалов на причалы нефтегавани Шесхарис в год; N – среднее число совершаемых швартовок к причалам нефтегавани Шесхарис в течение одного года (с 1999г. по 2004 г.).

Таблица 2. Вероятность совершения навала на причал нефтеналивного порта Шесхарис.

Год	Вероятность совершения навала на причал нефтеналивного порта Шесхарис
1999	$4.023 \cdot 10^{-3}$
2000	$4.354 \cdot 10^{-3}$
2001	$7.04 \cdot 10^{-3}$
2002	$5.053 \cdot 10^{-3}$
2003	$3.598 \cdot 10^{-3}$
2004	$1.619 \cdot 10^{-3}$

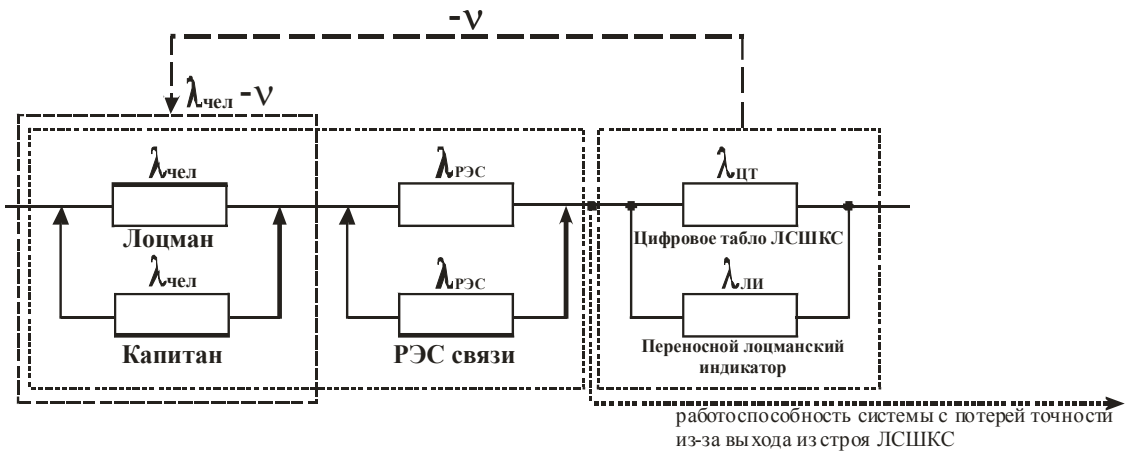


Рис. 1. Системно-структурная надежность схема контура взаимодействия лецмана с радиоэлектронными средствами

Тогда в соответствии со схемой, приведенной на рис.1 составим граф состояний для контура "лецман – радиоэлектронные средства":

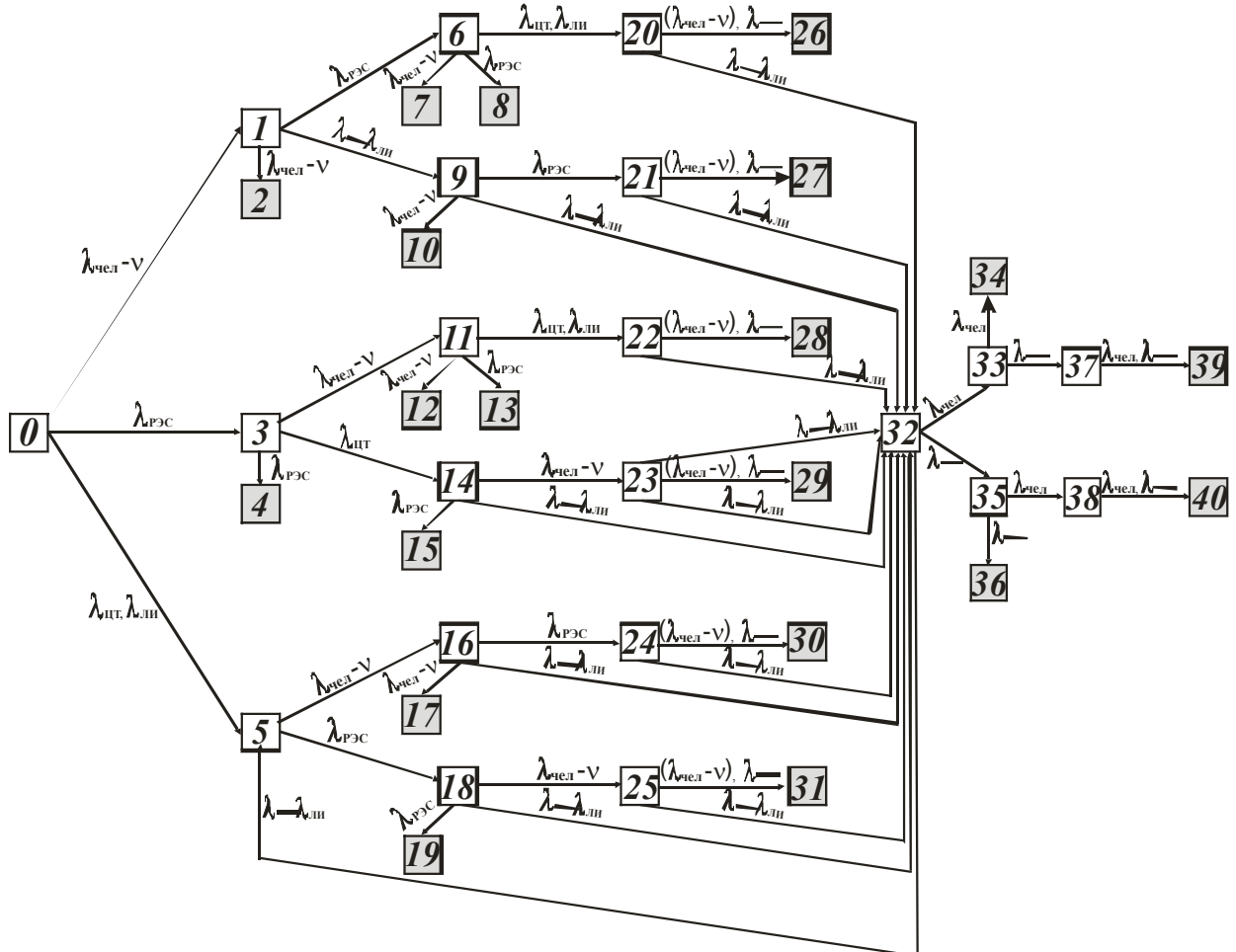


Рис. 2. Граф состояний для определения системно-структурной надежности контура взаимодействия лецмана с радиоэлектронными средствами

Система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чемпена для графа, представленного на рис.2:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_0}{dt} &= -((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_0(t) \\
 \frac{dP_1}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_0(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_1(t) \\
 \frac{dP_2}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_1(t) \\
 \frac{dP_3}{dt} &= \lambda_2 P_0(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_3 + \lambda_4)P_3(t) \\
 \frac{dP_4}{dt} &= \lambda_2 P_3(t) \\
 \frac{dP_5}{dt} &= (\lambda_3 + \lambda_4)P_0(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_5(t) \\
 \frac{dP_6}{dt} &= \lambda_2 P_1(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_6(t) \\
 \frac{dP_7}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_6(t) \\
 \frac{dP_8}{dt} &= \lambda_2 P_6(t) \\
 \frac{dP_9}{dt} &= (\lambda_3 + \lambda_4)P_1(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_9(t) \\
 \frac{dP_{10}}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_9(t) \\
 \frac{dP_{11}}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_3(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{11}(t) \\
 \frac{dP_{12}}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_{11}(t) \\
 \frac{dP_{13}}{dt} &= \lambda_2 P_{11}(t) \\
 \frac{dP_{14}}{dt} &= (\lambda_3 + \lambda_4)P_3(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{14}(t) \\
 \frac{dP_{15}}{dt} &= \lambda_2 P_{14}(t) \\
 \frac{dP_{16}}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_5(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{16}(t) \\
 \frac{dP_{17}}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_{16}(t) \\
 \frac{dP_{18}}{dt} &= \lambda_2 P_5(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{18}(t) \\
 \frac{dP_{19}}{dt} &= \lambda_2 P_{18}(t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_{20}}{dt} &= (\lambda_3 + \lambda_4)P_6(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{20}(t) \\
 \frac{dP_{21}}{dt} &= \lambda_2 P_9(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{21}(t) \\
 \frac{dP_{22}}{dt} &= (\lambda_3 + \lambda_4)P_{11}(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{22}(t) \\
 \frac{dP_{23}}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_{14}(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{23}(t) \\
 \frac{dP_{24}}{dt} &= \lambda_2 P_{16}(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{24}(t) \\
 \frac{dP_{25}}{dt} &= (\lambda_1 - \nu)P_{18}(t) - ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_{25}(t) \\
 \frac{dP_{26}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{20}(t) \\
 \frac{dP_{27}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{21}(t) \\
 \frac{dP_{28}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{22}(t) \\
 \frac{dP_{29}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{23}(t) \\
 \frac{dP_{30}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{24}(t) \\
 \frac{dP_{31}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{25}(t) \\
 \frac{dP_{32}}{dt} &= (\lambda_3 + \lambda_4) \cdot (P_5(t) + P_9(t) + P_{14}(t) + P_{16}(t) + P_{18}(t) + P_{20}(t) + P_{21}(t) \\
 &\quad + P_{22}(t) + P_{23}(t) + P_{24}(t) + P_{25}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2)P_{32}(t) \\
 \frac{dP_{33}}{dt} &= \lambda_1 P_{32}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2)P_{33}(t) \\
 \frac{dP_{34}}{dt} &= \lambda_1 \nu + \lambda_2)P_{24}(t) \\
 \frac{dP_{31}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{25}(t) \\
 \frac{dP_{29}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{23}(t) \\
 \frac{dP_{30}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{24}(t) \\
 \frac{dP_{31}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{25}(t) \\
 \frac{dP_{30}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{24}(t) \\
 \frac{dP_{31}}{dt} &= ((\lambda_1 - \nu) + \lambda_2)P_{25}(t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

где λ_1 – интенсивность отказов человека-оператора; λ_2 – интенсивность отказов РЭС связи; λ_3 – интенсивность отказов цифрового табло ЛСШКС; λ_4 – интенсивность отказов переносного лоцманского индикатора.

Функция готовности рассматриваемой системы, надежностьная схема которой приведена на рис. 1, определяется, в соответствии с [6]:

$$\Gamma(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_3(t) + P_5(t) + P_7(t) + P_{10}(t) + P_{13}(t) + P_{16}(t) + P_{19}(t) + P_{22}(t) + P_{25}(t) + P_{26}(t) + P_{27}(t) + P_{28}(t) + P_{29}(t) + P_{30}(t) \quad (3)$$

где $P_0(t), P_1(t), P_3(t), P_5(t), P_7(t), P_{10}(t), P_{13}(t), P_{16}(t), P_{19}(t), P_{22}(t), P_{25}(t), P_{26}(t), P_{27}(t), P_{28}(t), P_{29}(t), P_{30}(t)$ – вероятности нахождения системы в работоспособных состояниях.

Далее в соответствии с графом состояний и системой дифференциальных уравнений был проведен анализ системно-структурной надежности рассматриваемого контура, выполненный в математическом редакторе MathCAD 2003.

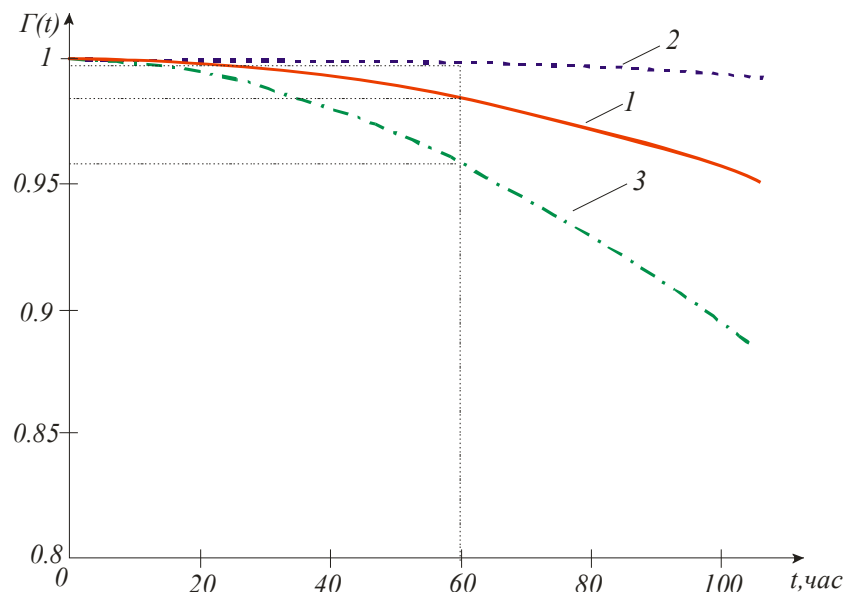


Рис. 3. Функция готовности контура "лоцман – радиоэлектронные средства":

$$1 - \lambda_{\text{ч}} = 5.034 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}, \lambda_{\text{РЭС}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}, \lambda_{\text{ЦГ}} = 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час};$$

$$\lambda_{\text{ЛИ}} = 4.3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}; 2 - \lambda_{\text{ч}} = 2.872 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}, \lambda_{\text{РЭС}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час},$$

$$\lambda_{\text{ЦГ}} = 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}; \lambda_{\text{ЛИ}} = 4.3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}; 3 - \lambda_{\text{ч}} = 7.19 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час},$$

$$\lambda_{\text{РЭС}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}, \lambda_{\text{ЦГ}} = 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}; \lambda_{\text{ЛИ}} = 4.3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}.$$

Приведенные результаты решения показывают, что применение структурного анализа ("принципа внешних дополнений" Стаффорда Бира) позволило проанализировать сложную систему швартовки, не прибегая к многомерным распределениям и большим базам данных.

Литература

1. Ивахненко А.Г. Кибернетические системы с комбинированным управлением. "Техника", К., 1986г.
2. Бир Стаффорд. Кибернетика и управление производством. ИИЛ, М., 1965.
3. Самонастраивающиеся системы (Справочник), под ред. П.И. Чинаева, "Наукова думка", 1989г.
4. Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации, М.: "Советское радио", 1984г.
5. Ерыгин В.В. Радиоэлектронные средства обеспечения безопасности швартовки крупнотоннажных судов в задаче снижения роли человеческого фактора (на примере систем безопасности мореплавания в регионе порта Новороссийск), диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новороссийск, 2005, 156 с.
6. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. М.: Энергоиздат, 1986.

10. Интеллектуальное дополнение человеческого элемента эргатической системы швартовки судна / В.В. Демьянов, А.П. Лицкевич, Н.В. Карбовец. Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. Спец. выпуск. Проблемы водного транспорта, Ч.1. – Ростов-на Дону. РГУ, 2006.

Постановка проблемы. Мореплавание судна начинается с отшвартовки от причала одного порта и завершается швартовкой к причалу (или причальному устройству) другого порта. Процессы отшвартовки-швартовки относятся к самым сложным фазам мореплавания, т.к. на них приходится до 80% всех нештатных происшествий, происходящих на плавающем судне.

Судном управляет человек-судоводитель, вооружённый техническими средствами судовождения (ТСС). Исторически сложилась двухуровневая модель функционирования сложного эргатического комплекса: швартуемое судно, управляемое человеком. На рис.1 эта модель судовой эргатической системы (СЭС) представлена двумя частями:

- техногенным элементом (ТЭ), обеспечивающим либо недоступные судоводителю данные, либо более точные для управления судном, чем его оценки на глаз;
- человеческим элементом (ЧЭ) – собственно судоводителем, обеспечивающим стратегическую цель и контролирующим оперативное качество судовождения.

Количественное описание меры надёжности функционирования СЭС в целом связано с возможностью вероятностного толкования *элементов обеспечения* (ТЭ и ЧЭ) и *факторов необеспечения* ($T\Phi^* = 1 - TЭ^*$ и $Ч\Phi^* = 1 - ЧЭ^*$) рабочих состояний в традиционных терминах приложений теории вероятности и надёжности. Звёздочками мы обозначили соответствующие меры надёжности, причём, **элемент-меры** $TЭ^*$ и $ЧЭ^*$ имеют физический смысл коэффициентов готовности K_r^T и $K_r^Ч$ (исправности функционирования) соответствующих частей СЭС, а **фактор-меры** $T\Phi^*$ и $Ч\Phi^*$ – смысл коэффициентов их отказности: $K_o^T = 1 - K_r^T$ и $K_o^Ч = 1 - K_r^Ч$. Статистическое описание надёжности судового ТЭ-подкомплекса СЭС не вызывает трудностей соответственно накопленному опыту описания эксплуатационной деградации характеристик самых разных технических средств (в атомной энергетике, радиоэлектронике, тепловых двигателях, авиационной и космической технике и т.п.). Сложнее дело обстоит с ЧЭ-подкомплексом СЭС.

Итак, меру деструктивной части деятельности (ошибки-отказы человека-оператора), обычно связывают с человеческим фактором (ЧФ), вносящим в СЭС неопределённость (отказность) порядка $K_o^Ч = 1 - K_r^Ч$. Количественное описание безошибочных действий ЧЭ и ошибочных – ЧФ сложных СЭС (в терминах $K_r^Ч$ и $K_o^Ч$) разра-

ботано недостаточно, т.к. статистическое описание СЭС в терминах параметров $K_r^{\text{Ч}}$ для ЧЭ и $K_o^{\text{Ч}}=1-K_r^{\text{Ч}}$ для ЧФ требует модернизации известных теорий:

- *надёжности* сложных систем {распространением синтеза $\sum_{(i=\text{Ч,Т})} K_r^i$ на нестационарную область неоднородных марковских процессов};
- *синергии* недостаточно полно определённых систем (поиском дополнительности менее определённой подсистемы ЧЭ более определённой ТЭ);
- *информации* избыточно доопределяемых информационных систем (поиском моделей дублирования или резервирования для получения потоков восстановления отказов, необходимых для достижения заданного уровня $K_r^{\text{Ч}}$) и т.п .

Из рис.1 видно, что параметр готовности K_r является медленно меняющейся вероятностной функцией, которая у современных СЭС изменяется в области значений: $0,9 \leq K_r^i \leq 0,9999999$. Его асимптотическое значение 1,0, соответствующее полной определённости состояния, даёт основание считать K_r^i мерой безотказного состояния СЭС, а с точки зрения теории информации – мерой полноты информации о безотказном состоянии. В линейном масштабе оси ординат изменения функции $K_r(t)$ вдоль переменной t графически неразрешимы, т.к. $K_r(t) \approx 1$, поэтому нами разработан специальный квазилогарифмический масштаб (см. ось $K_r=1-\lg \Delta$ на рис.1) для развёртки графических построений функций $K_r(t)$. Погрешность ординатного положения точек на графике $K_r(t)$ везде меньше соответствующего Δ .

В новой разработке технологии восстановления отказов ЧЭ в СЭС невозможно использовать традиционную практику *постотказного* восстановления ТЭ ремонтом, включением резерва, дублированием и т.п., если не сохранить веками используемую в судовождении практику "восстановления отказа" ЧЭ в *предотказном* состоянии "аттрактора отказа" методами маневров последнего момента (МПМ). Это становится возможным в СЭС благодаря большой длительности переходного процесса *вовлечения* судна в любое движение, которое потенциально чревато отказом (столкновением, навалом, посадкой на мель и т.п.). На языке теории надёжности такое состояние всегда обладает временным резервом. При определённых соотношениях длительностей переходного процесса вовлечения (τ_i) и противопоставляемого ему периода восстановления (τ_r), а именно при $\tau_r < \tau_i$, средствами экстренных *МПМ* отказ предотвращается. Нам представляется перспективным привлечение научных статистических методов теории надёжности систем с временным резервом к количественному описанию СЭС, т.к. интуитивистская практика управления транспортными системами путём спонтанных *МПМ*, изобретаемых опытными водителями, не имеет научного описания.

Мы покажем, что такие возможности появляются в сложных системах, в которых функционируют ТЭ- и ЧЭ-страты, обладающие по отношению друг к другу необходимой дополнительностью, особенно, в части повышения точности и быстроты

реакций слабейшего ЧЭ-звена. Указанные адаптационные и синергетические качества становятся возможными благодаря нооструктурности частей СЭС.

О нооструктурированности эргатической системы. В сложных эргатических системах, например, таких, как ядерный реактор, средства слепой посадки самолётов и т.п. уже давно (со середины 20-го века) замечено чёткое разделение всей системы на два подкомплекса (своеобразная функциональная её бифуркация) – на ТЭ и ЧЭ [1]. Эргатичность системы управления судном в меньшей (если не в большей) степени позволяет аналогичное же структурное разделение (см. рис.1).

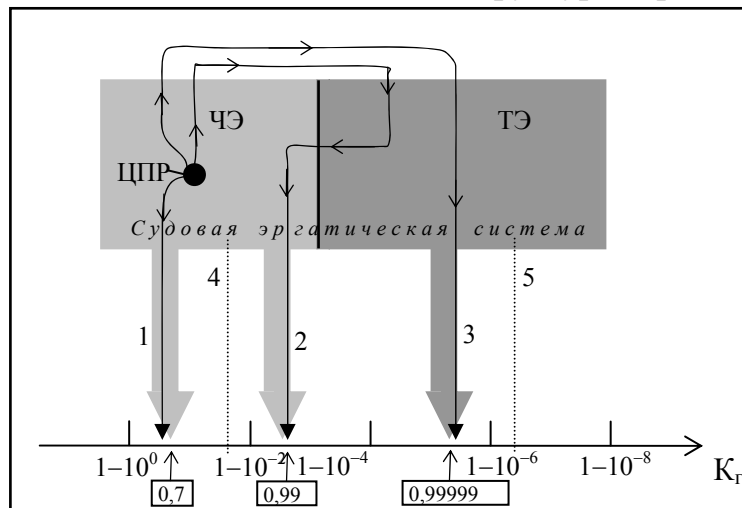


Рис.1. Древняя (1) и современные (2,3) эрготехнические модели реализации надёжности судовождения, выраженной в относительных единицах коэффициента готовности K_r судна выполнить безошибочный маневр с вероятностью $0 \leq K_r \leq 1$ (ось K_r имеет квазилогарифмический масштаб; показатель степени N в числе $1-10^{-N}$ определяет число девяток после запятой, например, $N=6$ означает $1-10^{-6}=0,99999$):

- 1 – без использования технических средств судовождения (ТСС) древним рядовым судоводителем;
- 4 – то же для выдающего судновода;
- 2 – с использованием ТСС и принятием всех решений судоводителем;
- 3 – с использованием ТСС и автоматов маневрирования без вмешательства судоводителя в большинство управленческих решений автомата, который находится лишь под его техно-эксплуатационным наблюдением;
- 5 – то же для идеального автомата маневрирования (без вмешательства судоводителя в решения автомата).

Гораздо менее известно, что структурно-бифурцируемые таким способом части СЭС предстают в виде двух принципиально разных квазидетерминированных нооструктур, остаточная неопределённость поведения которых в значительной степени проистекает сегодня от факторов первого порядка значимости (недостаточной изученности ЧЭ), чем от случайностей в ТЭ и ЧЭ, относящихся ко второму порядку значимости. В частности, статистический анализ потока отказов в структурах СЭС свидетельствует, что к началу 21-го века определённость рабочих состояний в ЧЭ не превышает уровней $K_r^Ч \leq 0,99$ (что соответствует отказности: $ЧФ^* = 1 - K_r^Ч \geq 10^{-2}$), в то время как в подсистемах ТЭ уже достигнуто $K_r^Т \leq 0,999999$ (т.е. их отказность значительно ниже: $ТФ^* = 1 - K_r^Т \geq 10^{-6}$).

Именно эти уровни надёжности K_r и показаны на рис.1 стрелками (1-3) прохождения команд для трёх исторически сложившихся моделей судовождения:

1) без ТСС на глаз (известна с древних времён): $ЧЭ^*_1 \approx ЧФ^*_1 \approx 0,5$, т.е. каждая вторая или третья швартовка на глаз чревата каким-нибудь происшествием;

2) с ТСС, данные которых осознаются судоводителем, вырабатывающим волевые управленческие решения, в той или иной мере игнорирующие часть данных ТСС (сегодняшняя судовая практика): $ЧЭ^*_2=K_{r2}\approx 0,95\div 0,99$; $ЧФ^*_2\approx 5\cdot 10^{-2}\div 10^{-2}$;

3) с ТСС и подсказывающими автоматами; данные от ТСС пропускаются через "сознание" автоматов, вырабатывающих оптимальные управленческие решения и исполняющих их без участия воли оператора, остающегося в роли компетентного наблюдателя (будущая судовая практика): $ЧЭ^*_3=K_{r3}\approx 0,99999$; $ЧФ^*_3\approx 10^{-5}$.

На рис.1 представлены три модели реализации *надёжности* СЭС с явным выделением двух частей, ответственных: за *надёжность* ТСС (это подкомплекс ТЭ); и за *качество* судовождения (это подкомплекс ЧЭ). Обратим внимание (возможно, впервые для этого круга задач) на нооструктурное строение деятельности обеих частей (ТЭ и ЧЭ). В кругу средств ТЭ функционирует прошлое сознание людей (омертвлённое в ТСС и автоматах, решающих *отдельные* узкие задачи управления судном лучше, чем человек). В ЧЭ представлен живой сознательный опыт судоводителя, накопленный в ходе его профессионального развития.

Надёжностное структурирование схем сложных СЭС открывает малоизученные возможности применения кибернетического принципа дополнительности к одному уровню (ЧЭ-уровню с низкой надёжностью действий) за счёт другого (ТЭ-уровня с меньшей неопределённостью) для повышения надёжности решения судоводительских задач. При этом к обоим уровням применим статистические методы исследования, соответствующие выявленной статистике их отказов. Мы применим модифицированные методики оперативного расчёта потоков: *внезапных отказов* СЭС, обусловленных конкретными условиями плавания (швартовки); и *постепенных отказов*, соотносимых с энергетической нагруженностью средств ТЭ и информационной нагруженностью и усталостью субъектов ЧЭ.

При соответствующей тщательности аттестации состояний указанных двух надёжностных стратов СЭС становится понятной методика оперативного восстановления необходимого уровня надёжности функционирования целого. Методика реализуется посредством оперативной нейтрализации потоков отказов квазидетерминистски осознанным их дополнением соответствующими потоками восстановления отказов до требуемого уровня функциональной готовности СЭС. В данной работе впервые ставится задача вывода на дисплей судоводителя двух уровней надёжности выполнения СЭС очередного маневра: рекомендованного автоматами и избранного судоводителем (например, в виде коэффициентов готовности СЭС на сравниваемых курсах, записываемых в "чёрный ящик").

Общие тенденции развития эргатических систем. Обратим внимание на основную тенденцию последнего столетия в развитии введённого выше структурного строения СЭС (см. рис.2), поясняющую созревшие возможности решения ими

управленческих задач с более высоким уровнем надёжности. Развитие подкомплекса ЧЭ, обеспеченное оснащением СЭС новыми ТСС и подсказывающими автоматами управления движением, тесно связано с успехами научного и промышленного прогресса индустриальной цивилизации. С другой стороны, успешная эксплуатация ТСС на судах флота связана с выросшей научно-технической компетентностью персонала операторов, обеспечивающих функционирование подкомплекса ЧЭ, что связано с новейшими достижениями общего и профессионального образования специалистов водного транспорта.

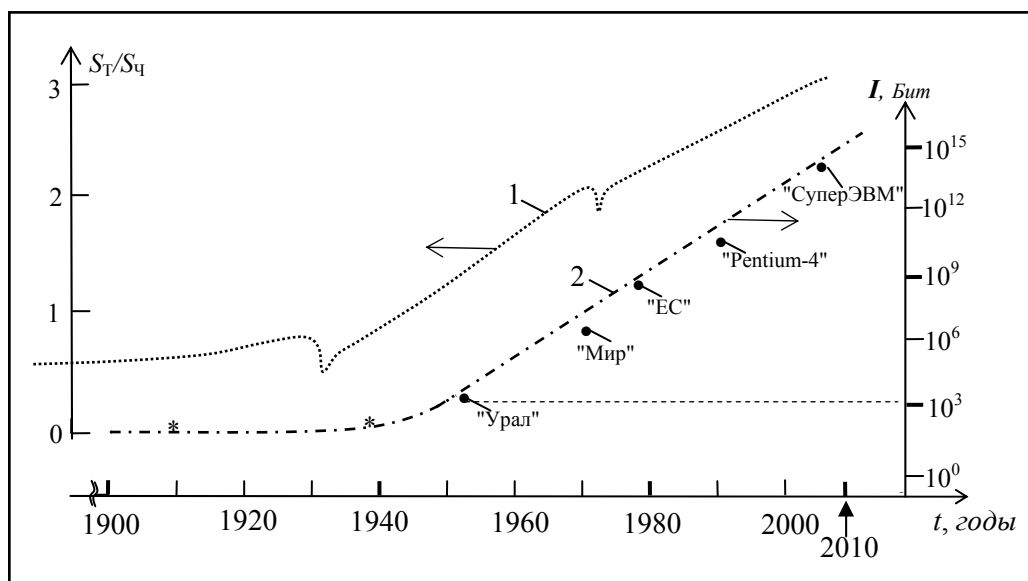


Рис.2. Характеристики технического прогресса устройства эргатических систем в 20 веке:
 1 – структурного строения $S_T/S_Ч$ эргатических систем, как отношения стоимостей прошлого (S_T) и живого ($S_Ч$) труда на создание и функционирование подсистем техногенного (ТЭ) и человеческого (ЧЭ) элементов (по данным для органического строения капитала экономики США [2]);
 2 – мощности памяти вычислительных средств, использованных человеком в своей деятельности: * – бух. счёты, арифмометры, электро-механические вычислители; • – электронные ЭВМ.

Для составления самых общих представлений о тенденциях развития этих двух (ТЭ и ЧЭ) относительно самостоятельных подкомплексов, образующих эргатические системы производственно-технологической практики человечества, мы приводим две ключевые зависимости 20-го века (см. на рис.2). Кривая 1 показывает вековой тренд роста структурно-производственного строения $S_T/S_Ч$ эргатических систем, как отношения стоимости прошлого труда-сознания (S_T), затрачиваемого на разработку, создание и функционирование ТЭ, к стоимости живого труда-сознания ($S_Ч$) специалистов подкомплекса ЧЭ, обеспечивающих общий успех деятельности эргатической системы как целого; кривая 2 – тренд роста объёма памяти (I , бит) вычислительных средств и автоматов, используемых человеком в своей научной и производственно-технологической деятельности

Из кривой 1 рис.2 видно, что до середины 20-го века преобладающим во всей производственно-практической деятельности человека был живой труд ($S_Ч > S_T$), а кривая 2 подтверждает эту особенность – труд людей докомпьютерной эпохи был

слабо вооружён вычислительной техникой. Эти общие для всех отраслей экономик индустриальных стран закономерности хорошо объясняют созревшие технологические условия для внедрения подсказывающих автоматов в управление транспортными средствами (о чём свидетельствует прогресс их использования в военных сферах, идущий с опережением на 15÷30 лет).

Скрытые дополнения к неопределённости действий эргатической системы. Из данных рис.2 вытекают несколько важных следствий для решения поставленной в настоящей работе проблемы поиска относительно скрытых дополнений для снятия неопределённостей в действиях СЭС в ходе швартовки судов.

Внезапные и постепенные отказы в СЭС. С встречающимися в плавании опасностями мы будем связывать потоки отказов разных частей СЭС в ходе швартовки судна, а с действиями, предотвращающими эти происшествия – соответствующие необходимые потоки восстановления отказов. Применение статистических теорий к описанию надёжности ТЭ-структур не вызывает сомнений, хотя при решении задач безаварийного маневрирования возникают *особенности* применения используемой (в том или ином случае) статистической базы.

Во-первых, требуется модификация методов решения надёжностных задач при одновременном учёте таких специфических потоков внезапных и постепенных отказов ТЭ-структур, когда модели марковских процессов и уравнения Колмогорова становятся неоднородными. Во-вторых, традиционный учёт необходимых потоков восстановления указанных отказов при использовании быстрых автоматов уводит решаемые задачи в нетрадиционную нестационарную область решений, диктующую дополнительные требования к статистической базе данных.

Ещё сложнее аналогичные расчёты коэффициентов вероятностной готовности ($K_r^ч$) ЧЭ-структур СЭС. В поток отказов ЧЭ надо включать любое возникающее по воле судоводителя состояние судна, т.к. оно всегда потенциально опасно и в ближнем (в зоне порта) линейном и дальнем геодезическом продолжении этого курса до точки пересечения с опасным препятствием (другим судном, банкой, берегом острова или, наконец, с берегом континента). Отгороженность судна от этой "опасности" большим временем *дальнего перехода* к ней (часы и даже сутки) делает *вероятность* встречи с указанной точкой пересечения настолько низкой (благодаря огромному временному резерву), что *её* вольно или невольно не замечали на фоне других статистических ошибок судовождения.

В ближнем плавании, особенно при швартовке игнорирование таких потенциальных угроз отказа недопустимо, т.к. точка пересечения линейного продолжения любого текущего вектора скорости судна с ближайшим объектом имеет гораздо меньший резерв времени (минуты и даже секунды), чтобы сконструировать оптимальный МПМ. Опыт показывает, что в одном из нескольких десятков случаев рас-

чёт безопасного МПМ недоступен судоводителю без высокоточных ТСС и подсказок быстрых машин. Очевидно, давно назрела необходимость вывода на операторский монитор оптимального решения подсказывающих автоматов, дающее информацию о временном резерве, определяющем допустимое время восстановления $\tau_{рез.}$ вероятного отказа путём безопасного МПМ.

Случайностные (полностью неопределённые) и вероятностные (неполно определённые) причины отказов СЭС. Разделение случайных отказов от вероятностных не общепринято. Необходимость связана с тем, что при анализе вероятностной меры готовности K_r СЭС имеем дело с пульсами, причины которых либо недоступны опыту, либо статистика их повторяемости неизвестна. Встреча детерминированных действий управляемого судна (с энергетикой $У$) со случайностными пульсами механической природы, имеющими энергетикой $Ш$, уже при соотношении $У \sim Ш$ (характерном для швартовки) приводит к утрате управляемости судна (оно столь же неуправляемо, как и управляемо: $1 - K_r \sim 0,5 \sim K_r$).

Методы повышения отношения сигнал/шум, известные из теорий процессов в электродинамических системах, прямо не применимы к механическим системам. Поэтому чисто случайные возмущения состояний судна могут быть учтены только методами, использующими хоть какие-то априорные знания о потоках внезапных отказов, которым противопоставляется соответствующий поток восстановления их внезапных действий. Априорное знание временного резерва внезапного отказа при швартовке является, пожалуй, единственным средством их нейтрализации. Это признание того, что действие СЭС всегда остаётся не полностью детерминированным в любой из представленных на рис.1 трёх схем швартовки, и задача оптимального решения на маневр состоит в поиске максимального её K_r .

Таким образом, метод внешнего дополнения определённости действий ЧЭ-части (более стохастичной) в виде точных решений ТЭ-части (менее стохастичной) предполагает сбор статистической базы, необходимой для поиска оптимальных решений методами теории надёжности. Очевидно, что описанная выше "статистическая база" внезапного отказа весьма специфична (требуется "мгновенное" определение временного резерва $\tau_{рез.}$ до отказа для каждого положения векторов скорости носа и кормы судна, а не анализ некой многолетней статистики).

Нестационарность потоков отказов при маневрировании судна. Основными требованиями к потоковым функциям отказности в этих базах данных являются:

- стационарность на временных интервалах их применения (особенно при решении неоднородных задач);
- соответствие выбираемым функциям распределения;
- адекватность условиям всего пространства оперативного применения базы при решении неоднородных задач.

Проиллюстрируем требования к вариативности статистической базы данных для потоков внезапных отказов на конкретном примере прохождения судном узкостей с границами разного уровня опасностей для мореплавания. На рис.3_а показан путь (1) судна (2) на акватории с априори выявленными границами опасности (3, 4), а на рис.3_б представлена функция $\lambda(r)$ изменения потока λ внезапных отказов на разных участках стеснённости маневров. Видно, что на участках трассы (1) в областях (7 и 8) повышенного стеснения маневров (от сужения зоны прохода мелей 3 и 4) потоки внезапных отказов λ , причиной которых могут стать неоптимальные управленческие действия судоводителя, резко возрастают. Для сравнения дан случай ничтожной вероятности отказов 5 при маневрировании судна в открытом море (когда опасностей 3 и 4 нет)

К внезапным ошибкам-отказам могут приводить в ситуации на рис.3_а:

- *неточность* работы ТСС, на основе которых судоводитель принимает управленческие решения;
- *неправильность* учёта течения 5, направления и силы ветра W и др. внешних причин, создающих неопределённость состояния подвижности швартуемого судна в направлении к точке встречи с опасным объектом;
- *просто зевки* от низкой разрешающей силы глазомера (когда игнорируются или отсутствуют подсказки автоматов), перегруженности судоводителя потоками информации о зреющих отказах, связанные с наложением неправильных и невыполненных во время решений по управлению судном, и т.п.

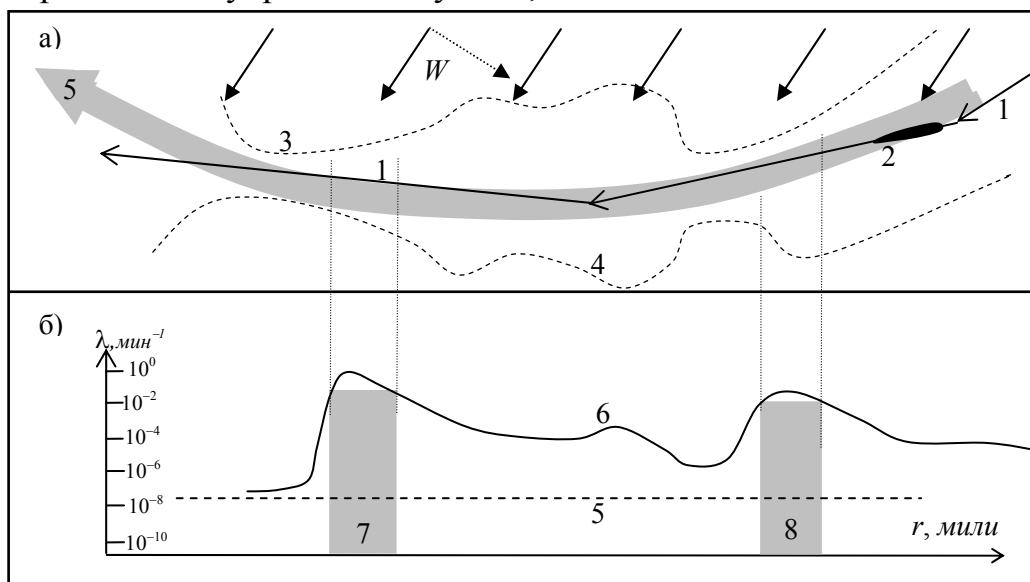


Рис.3. а) Схема прохождения судном узкостей, характеризующихся повышенной опасностью возникновения происшествий, грозящих безопасностью судна и экологической опасности акватории моря {1 – трасса судна 2; 3 и 4 – правая и левая граница опасностей относительно трассы судна; 5 – приповерхностное течение; W – вектор текущего направления ветра (сплошной) и сектор изменения его направления (пунктир)}.

б) Функциональная зависимость потока внезапных отказов (б) эргатической системы управления судном, причиной которых являются неоптимальные волевые действия судоводителя, т.е. подкомплекса ЧЭ по рис.1 (5 – поток отказов в отсутствие границ 3 и 4, стесняющих маневры судна; 7, 8 – участки трассы с повышенными потоками внезапных отказов).

При этом особую опасность представляют именно невыполненные во время решения, т.к. они дольше других причин внезапных отказов, находящихся в поле внимания судоводителя, остаются вне его внимания и обрекают СЭС на неоптимальность движения. Когда же они внезапно проявляются в преддверии катастрофы, то предотвратить её уже, как правило, нельзя никакими МПМ ("последний момент" упущен).

Выход из порочного круга текущей неопределённости СЭС видится в использовании скрытых дополнений для адекватизации состояния СЭС вырабатываемым автоматами оптимальным управленческим решением, недоступным точностным и скоростным возможностям сознания судоводителя.

О координатной точности решений судовой эргатической системы. В работе [3] было показано, что одним из существенных факторов сохранения неопределённости решений СЭС при заходе на портовые акватории швартовки является дефицит точности определения местоположения судна на акватории и скорости его перемещения. Декаметровые погрешности определения координат судна с помощью обычных ТСС и визуального наблюдения судоводителя за внешней обстановкой, вполне адекватные задачам судовождения в дальних морских районах плавания A_3 , A_2 , и во внепортовых водах A_1 , становятся остро (многопорядково) недостаточными для решения задач швартовки судна [3]. Кроме того, швартовка многократно усложняется необходимостью вести измерение координат и скоростей отдельно для центральной, кормовой и носовой частей судна, становящегося неточечным объектом на тесных швартовочных акваториях.

При традиционных *декаметровых погрешностях* определения координат "на глаз" неопределённость состояний судна, как эргатической системы, становится настолько опасной (и для самого судна, и уже стоящих у соседних причалов судов, и для самих причалов), что на несколько десятков швартовок случается одно происшествие (навал, посадка на мель и т.п.). Это недопустимо низкая надёжность со слишком дорогими последствиями. Актуальность высокоточной дальнометрии была доказана экспериментально. Только за счёт реализации сантиметровой точности определения положения борта судна относительно пирса [3] достигнуто значительное повышение (от 0,97 до 0,999) коэффициента готовности K_r безотказной швартовки танкеров (см. рис.4, состояние 3).

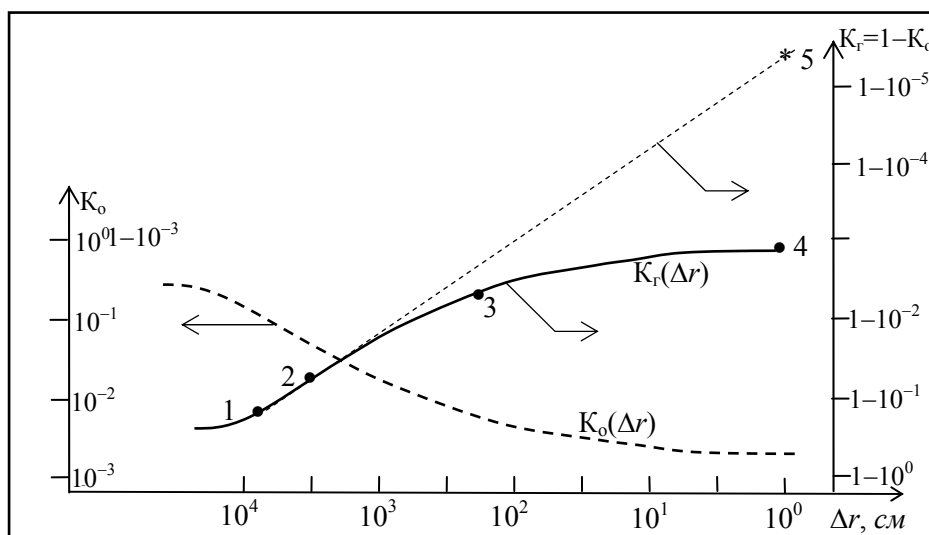


Рис.4. Зависимость коэффициента готовности K_r и отказности K_o судовой эргатической системы безотказной швартовки танкера от абсолютной точности Δr определения его координат на поверхности акватории и расстояний от швартуемого борта до линии пирса (уровень $1-10^{-3}=0,999$ соответствует одному отказу, например, навалу, из 1000 швартовок):

1 – "на глаз" без ТСС; 2 – с использованием ТСС с *декаметровой* погрешностью измерения положения судна; 3 – с использованием ТСС *сантиметровой* погрешностью измерения положения судна относительно линии причаливания; 4, 5 – то же, что в 3, но при использовании полуавтоматов, разрабатывающих для судоводителя поток восстановления его ошибочных решений (отказов), которые могли бы привести (и привели бы, при неучете решений автомата) к аварии; в состоянии 4 автомат учитывает только положение линии швартовочного пирса, а в 5 – на всей акватории швартовки.

На этом рисунке приведены рассчитанные зависимости коэффициентов готовности K_r (безотказной швартовки танкера к береговому терминалу "Шесхарис") и отказности K_o от абсолютной точности измерения координат и положений носового и кормового участков борта относительно линии швартовки к пирсу. Из сравнения кривых $K_r(\Delta r)$ и $K_o(\Delta r)$ хорошо видно, что 7%-росту K_r соответствует многократное снижение коэффициента отказности K_o , который пропорционален числу деструктивных происшествий при швартовках судов в ряду общего числа швартовок к этому терминалу. На основе собранной в [3] статистической базы по аварийности при швартовках танкеров к терминалам "Шесхарис" в порту Новороссийск методами прямого расчётного эксперимента показано, что одной из причин неопределённости СЭС управления швартовкой остаётся низкая (декаметровая) погрешность глазомерного определения координат судна на акватории швартовки.

Однако, в [3] исследована только одна, по-видимому, самая значимая причина неопределённости управленческих решений СЭС при швартовках танкеров, связанная с низкой точностью определения положения борта судна относительно линии причаливания к пирсу на глаз (по сценарию 2 на рис.1). С внедрением лазерной дальнометрии расстояний между линией швартовки и бортом судна отказы (навалы и т.п.) снизились в несколько раз. С внедрением в порту Новороссийск лазерной дальнометрии сравнились две флотские технологии швартовки, древняя глазомерная (декаметровая погрешность оценки расстояний) и современная радиометриче-

ская, имеющая сантиметровую точность в интервале дальностей $0 < r \leq 3$ мили, и опыт показал, что эффективнее последняя.

Но полная реализация достоинств высокоточной дальнометрии может быть реализована только на основе более полного использования принципа взаимной дополнителности в работе подкомплексов ЧЭ и ТЭ СЭС, как это показано реализацией 4 на рис.4. Эта реализация предполагает, что ТСС и подсказывающие автоматы ТЭ снабжают судоводителя не только данными о дистанциях с сантиметровой точностью, но и генерируют для судоводителя решения потока восстановления всех неправильно принимаемых им маневровых команд управления на самой ранней (предотказной) стадии их реализации. Эффективность действия такого потока восстановления отказов сохраняется до тех пор, пока длительность развития предотказного состояния, запущенного неправильно данной судоводителем маневровой команды, остаётся больше времени его восстановления исправляющим МПМ, подсказанным автоматом.

Скоростные возможности решений судовой эргатической системы. Возможность упомянутого выше интеллектуального дополнения к неоптимальным решениям ЧЭ (на рис.4 это 3) потока восстановления от ТЭ появилась сравнительно недавно. Если судить по данным рис.2 о росте информационной *hard*-памяти ЭВМ (у которых оперативная память обычно на порядок меньше *hard*-памяти), то возможности решать задачи на встречу подвижного объекта с препятствием в реальном масштабе времени швартовки появились в лабораторных разработках – в 1970-х годах, а в широких практических приложениях – 20 годами позже. Заметим, что в нашем подходе решение задач на встречу отдельных участков борта судна с препятствием в реальном масштабе времени для выполнения *корректирующих* МПМ как раз представляет собой процедуру генерации интеллектуального дополнения от ТЭ к ЧЭ в виде потока восстановления отказов (ошибочных решений судоводителя).

Скоростные возможности решения таких задач определяются в отсутствие компьютерных автоматов только быстротой ума судоводителя, а они (эти возможности) весьма ограничены даже у самых опытных профессионалов. Низкая точность визуального определения положения судна при швартовке и ещё более низкие возможности решения человеком в уме задач на встречу управляемого им судна с тем или иным препятствием определяют ту высокую вероятность отказа ЧФ при швартовке судна, которая наблюдается сегодня на флоте. На рис.4 это состояние 1 (при швартовках на глаз без ТСС) и состояние 2 (при швартовках с ТСС, имеющих декаметровую точность определения координат, и без интеллектуальной подсказки автоматов ТЭ-подкомплекса).

Прямые расчёты состояний надёжности СЭС швартовки, дополненной только инструментами с сантиметровой точностью определения положения борта судна относительно линии швартовки к пирсу, подтверждаются (см. состояние надёжности 3 по рис.4) ростом коэффициента готовности по сравнению с предыдущим случаем 2. Дальнейшая интеллектуализация швартовки с помощью подсказывающих автоматов ТЭ-подкомплекса, решающих задачи на встречу швартуемого борта судна с причальной линией пирса (одномерный контроль) в реальном масштабе времени, повышает надёжность СЭС до $K_T \approx 0,999$ (4 на рис.4).

На рис.4 приведён пример (состояние 5) расчёта ещё более высоких показателей надёжности выполнения операций швартовки, достигаемых с помощью СЭС с информационно расширенным интеллектуальным дополнением *определённости* положения судна относительно всех объектов швартовочной акватории (двумерный контроль), *вырабатываемым* подсказывающими автоматами ТЭ-подкомплекса для судоводителя ЧЭ-подкомплекса. Швартовка больших судов (до 300 метров) на акватории с размерами порядка мили, окаймлённой с трёх сторон пирсами с пришвартованными судами, является весьма сложным и опасным технологическим процессом. Отказы (навалы, столкновения и т.п.) в таких условиях при управлении швартовкой на глаз случаются чаще не у пирса назначения (к которому приковано внимание всех операторов), а в поперечных к нему зонах опасного контакта с соседними уже пришвартованными судами.

Глазомерная оценка расстояний от оконечностей швартуемого судна до окружающих объектов разрешает безаварийное восстановление отказов (в непрерывном потоке их возникновения в ходе швартовки) средствами *корректирующих МПМ* с вероятностью всего $K_T = 0,7 \div 0,9$ (состояние 1 на рис.4). Достижение надёжности швартовки уровня 5 по рис.4 (уровня 0,99999) достигается обустройством судна дальнометрией сантиметровой точности и решением на ЭВМ в реальном масштабе времени (например, через каждые 5 сек) задач встречи носа и кормы швартуемого судна с окружающими объектами.

Расчёты K_T для реализации состояния 5 по рис.4 СЭС решает восемь задач: две задачи встречи швартуемого борта с пирсом, и шесть задач встречи носа и кормы с ближайшими внешними объектами (в трёх секторах от носа и кормы с диаграммами обзора по 60°). Вырабатываемый поток восстановления отказов способен автоматически ликвидировать своевременным *корректирующим МПМ* каждый из непрерывно зреющих в процессе швартовки отказов с надёжностью $K_T = 0,99999$.

Таким образом, концентрация внимания только на кинематических отношениях швартуемого борта судна с линией причаливания пирса [3] при сантиметровой точ-

ности дальнометрии позволяет лишь частично (только на два порядка, см. состояния 3 на рис.4) уменьшить коэффициент отказности СЭС. Интеллектуальное дополнение от ТЭ-подкомплекса к ЧЭ-подкомплексу в виде оптимизации темпа встречи борта с пирсом позволяет ещё в несколько раз повысить надёжность процессов швартовки (см. состояние 4 на рис.4). Развитие этого направления машинного контроля швартовки с помощью высокоточных дальномеров в 6–10 направлениях вокруг судна и подсказывающих автоматов настолько повысит надёжность процесса, что в ряду сотен тысяч швартовок будет случаться только одна авария (состояние 5 на рис.4). Это указывает на перспективность подсказывающих автоматов для повышения надёжности процессов швартовки судов.

Методика расчёта коэффициента готовности судовой эргатической системы к безаварийной швартовке. Вероятностная аппроксимация процесса функционирования ЧЭ-подкомплекса сложной СЭС марковским процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем основывается на гипотетическом предположении о том, что любое кинетическое состояние швартуемого судна, как было определено выше, является внезапно предотказным. В этой модели каждому состоянию вектора скорости V маневрирующего судна предпосылается грядущая внезапная опасность встречи судна (через некоторое время $\tau_{рез}$, которое мы называем резервным) с одним из окружающих внешних объектов, случайно попадающих на линейное продолжение V . Согласно теории надёжности, отказы от неблагоприятного сочетания внешних факторов, являются внезапными [4]. Как показано на рис.3б, особенностью потока внезапных отказов ЧЭ-подкомплекса является его случайное непостоянство: $\lambda_i(t) \neq const.$, обусловленное разноудалённостью окружающих судно внешних объектов на периметре швартовной акватории.

Вероятности состояний технической системы описывают соответствующий марковский процесс его эволюции во времени. Системы с непрерывным временем предполагают, что переход системы из одного состояния в другое может осуществляться в любой момент времени, т.е. время пребывания системы в каждом состоянии представляет собой непрерывный случайный интервал Δt . Система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена для вероятностей реализаций состояний ординарного дискретного марковского процесса имеет вид [5]:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -\sum_{i=0}^k c_i(t) \cdot P_i(t) + \sum_{j=1; i \neq j}^k \lambda_{ji}(t) \cdot P_j(t), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где $c_i(t)$ – интенсивности ухода из состояния S_i , $\lambda_i(t)$ – интенсивности переходов между состояниями S_i и S_j , $P_i(t) = P(t; S_i)$ – вероятность того, что в момент времени $t > t_0$ процесс будет находиться в состоянии S_i .

Если коэффициенты уравнений Колмогорова (интенсивности потоков отказов и потоков восстановления) зависят от времени, как показано на рис.3б, имеет место неоднородный марковский процесс с дискретными состояниями на конечном интервале времени $\Delta t \ll \tau_{рез}$. Как отказы аппаратуры описывают потоками внезапных (от воздействия внешних неблагоприятных факторов) и постепенных (от старения и износа) отказов элементов ТСС и автоматов ТЭ-подкомплекса, аналогично отказы судового ЧЭ-подкомплекса (т.е. человека) будем описывать потоками внезапных и постепенных отказов с временным резервом $\tau_{рез}$. С первыми мы связываем каждую новую грядущую опасность встречи маневрирующего судна с одним из окружающих внешних объектов, случайно попадающих через некоторое время $\tau_{рез}$ на продолжение всё время меняющейся при швартовке линейной траектории судна. С потоками постепенных отказов ЧЭ будем связывать любое отличие волевого решения судоводителя о маневре судна от оптимального решения.

В таком представлении закон распределения ошибок будет существенно отличаться от экспоненциального и для анализа надежности ЧЭ-подкомплекса необходимо использовать более общую модель *марковских неоднородных процессов*. Динамика перехода системы из одного состояния в другой теперь будет описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова с переменными коэффициентами (сменяемыми через интервалы времени Δt интенсивностями отказов, при $\Delta t \ll \tau_{рез}$). Очевидно, что здесь анализ надёжности близок к области нестационарной зависимости вероятности отказов от времени.

Так как каждая новая грядущая опасность встречи швартуемого судна с одним из окружающих внешних объектов и процессы, сопровождающие волевое решение судоводителя на очередной маневр, часто представляет собой результат суммарного воздействия многих независимых факторов, нормальное распределение является для них хорошим приближением.

Суммарную интенсивность внезапных и постепенных отказов ЧЭ-подкомплекса СЭС в предположении указанной их независимости будем представлять, как и в случае анализа надёжности ТЭ-подкомплекса, в следующем виде:

$$\Lambda(t) = \lambda_0(t) + \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left(-\frac{(t - T_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \left[1 - F\left(\frac{t - T_0}{\sigma}\right)\right]^{-1}, \quad (2)$$

где $T_0 = \tau_{рез}(V)$ – среднее время наработки решений до отказа (зависит от скорости швартового дрейфа судна и расстояния до опасности); σ – среднеквадратическое

отклонение наработки до отказа; $\lambda_o(t)$ – зависимость потока внезапных отказов ЧЭ (внезапно возникающих при швартовке состояний потенциальной встречи судна с окружающими объектами) от времени.

Варианты распределений $\Lambda(t)$ суммарных потоков отказов, возникающих по законам (2) в судовом ЧЭ-подкомплексе при швартовках танкеров на акватории у терминала "Шесхарис", приведены на рис.5.

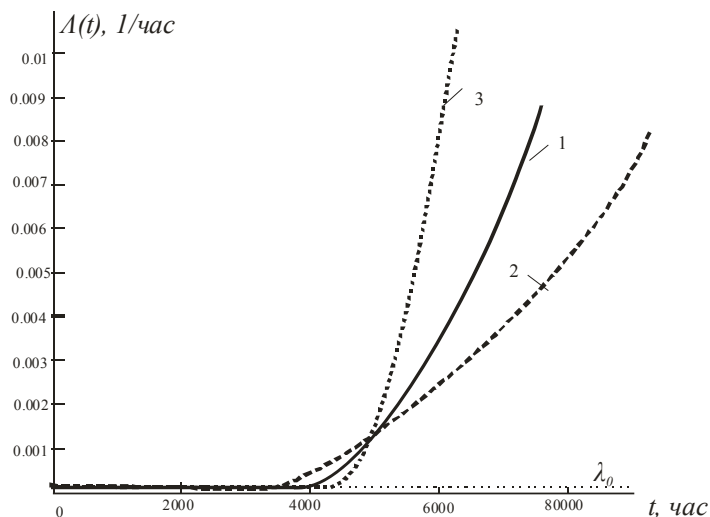


Рис.5. Временные зависимости суммарной интенсивности внезапных и постепенных отказов в ЧЭ-подкомплексе СЭС швартовки: 1 – среднее квадратическое отклонение 20% от T_0 ; 2 – среднее квадратическое отклонение 30% от T_0 ; 3 – среднее квадратическое отклонение 10% от T_0 .

Видно, что для анализа надежности выполнения швартовных операций при учёте совместного проявления постепенных и внезапных отказов ЧЭ-подкомплекса, переход (особенно в конечных фазах швартовки) к неоднородным марковским процессам неизбежен. Среднее квадратическое отклонение среднего времени безотказной работы по постепенным отказам (увеличение интенсивности потока отказов, усталость операторов, усложнение решаемых задач) по определяющему параметру T_0 на разных участках судового, буксирного и берегового ЧЭ-подкомплекса нами принято 10%÷30%.

На рис.6 представлены зависимости (от длительности t процесса швартовки) коэффициента вероятностной готовности $K_r^Ч(t)$ судового ЧЭ-подкомплекса к безопасной швартовке танкера в разных её фазах. Именно по серии таких зависимостей были построены на рис.4 зависимости коэффициента вероятностной готовности $K_r^Ч(\Delta r)$ СЭС от абсолютной погрешности дальномеров, обслуживающих судовой ЧЭ-подкомплекс измерениями разной точности дистанций от разных участков борта танкера до ближайшего опасного объекта. Специальные детали алгоритма и программы расчётов будут рассмотрены в другой работе.

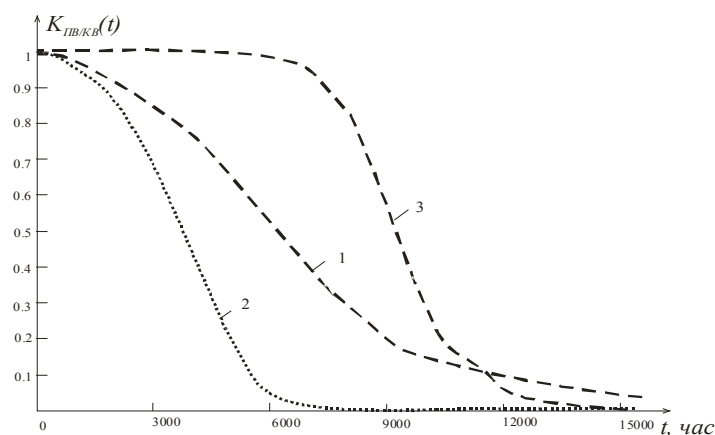


Рис.6. Зависимость коэффициента готовности $K_{ГВ/КВ}(t)$ судовой ЧЭ-подсистемы от времени швартовки судна, : 2 – для декаметровой точности дальнометрии; 1 – при сантиметровой точности дальнометрии носа и кормы относительно линии причаливания к пирсу; 3 – при сантиметровой точности дальнометрии носа и кормы относительно всех объектов, окружающих причаливаемое судно.

Таким образом, в настоящей работе изложена новая методика расчёта вероятностной меры готовности $K_{Г}^{\text{Ч}}(\Delta r)$ сложной СЭС к безопасной швартовке судна в зависимости от абсолютной точности дальномеров, обслуживающих судоводителей. ЭВМ решают на резервном *интервале работы до отказа* ($\tau_{\text{рез}}$) задачи встречи каждого участка борта судна с опасным объектом и вырабатывают судоводителю оптимальную подсказку на очередной маневр. Актуальной мерой опасности (ошибок ЧФ) швартовных операций, исходящей от судового ЧЭ-подкомплекса, в данной методике выступает фактор опасности $K_0^{\text{Ч}}=1-K_{Г}^{\text{Ч}}$, в обиходной практике называемый человеческим фактором. При соответствующей записи в "чёрный ящик" параметров траекторных маневров судна при швартовке появляется возможность количественного описания ЧФ.

Литература

1. Надёжность атомных реакторов
2. Демьянов В.В. *Эвалектика ноосферы, ч.3*: Новороссийск/НГМА, 2001 (880 с).
3. Дисс. Ерыгина В.В.
4. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
5. Лицкевич А.П., Демьянов В.В., Бойко А.И., Карбовец Н.В. Системная надёжность морского радиоэлектронного оборудования. – Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2005. – 185 с.

11. Определение вероятностных характеристик морской эрготехнической системы управления швартовкой судов с учетом временного фактора / Н.В. Карбовец, Н.Ю. Росторгуева, В.В. Демьянов. Сборник научных трудов. Выпуск 11. – Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2006.

В последние годы наблюдается тенденция роста числа судозаходов в крупные порты России. Это, в частности, относится к порту Новороссийск, через который уже на сегодняшний день, проходит одна треть общего объема экспортируемой нефти, и заходят танкеры, имеющие до 200 тыс. тонн нефти на борту. Поэтому всё большее значение приобретает оснащение портов современными радиоэлектронными системами высокоточного определения и надёжного контроля местоположения судна как в прибрежных морских районах плавания с высокой интенсивностью судоходства, так и на установленных фарватерах акваторий портов и особенно на заключительном этапе судозахода, при швартовке судна к причалу. Швартовка, как заключительный процесс движения судна, является одной из сложнейших и, как отмечалось выше, опасных операций. Поэтому обеспечение надежности рассматриваемой системы приближения крупнотоннажного судна к причалу является важной составляющей обеспечения безопасности выполнения швартовных операций, а, следовательно, что чрезвычайно важно, и безопасности человеческих жизней, порта, окружающей среды.

С целью повышения надежности системы управления швартовкой необходимо в первую очередь совершенствовать те звенья системы, где наблюдаются наибольшие отклонения от нормальных условий функционирования. В человеко-машинных системах таким звеном является человек-оператор. Из числа ошибок, допускаемых в процессе управляющих действий, наиболее частыми являются ошибки оператора, возникающие в процессе переработки большого количества информации, ошибки оценки ситуации и принятия решения [1]. Ошибки оператора, связанные с переработкой поступающей при швартовке судна информации, возникают по следующим причинам:

- получение ошибочных данных;

- выбор не подходящего к данным условиям способа и критериев обработки информации;
- нарушение действующих правил и регламентов действий при швартовочных операциях;
- допущение неточностей при определении расстояния от швартуемого судна до причала, в результате чего растут погрешности используемых при швартовке данных.

Это в свою очередь вызывает ситуацию, при которой ошибки, возникшие на одних этапах восприятия и переработки информации, порождают в дальнейшем дополнительные ошибки, которые сказываются на оценке ситуации в целом, на принятии решения и его реализации.

Исходя из сказанного выше, возникает необходимость изучения временных характеристик деятельности человека-оператора для более полного учета их при расчетах надежности систем управления.

Рассмотрим задачу определения вероятности возникновения аварийной ситуации в процессе швартовки судна к причалу в результате возникновения ошибки из-за неправильно оцененной информации и связанных с этим ошибочных действий человека-оператора, а также недостаточного количества времени, необходимого для ее устранения. Построим вероятностную модель оценки надежности эрго-технической системы управления швартовкой судна с учетом человеческого фактора. В процессе швартовки судна к причалу оператор-судоводитель (лоцман) может допускать ошибки в управлении, зачастую ведущие к возникновению аварийной ситуации. При этом для принятия решения и устранения возникших ошибок оператору требуется некоторое резервное время, в течение которого он может не опасаться за возможность развития аварийной ситуации. Обозначим время, в течение которого оператор отвлекается для оценки окружающей обстановки и различных секторов швартовки, величиной t_0 , а время, которым располагает оператор для устранения ошибки и предотвращения аварийной ситуации, в частности, навала судна на причал – величиной $t_{рез}$.

Резервным временем системы $t_{рез}$, находящейся под воздействием данного возмущения, назовем избыток времени (над минимально необходимым), которым располагает оператор для предотвращения отклонений ее параметров за допустимые пределы и приведения их в заданное состояние [2]. В течение этого времени оператор может принимать решения и вносить (в случае необходимости) исправления в принимаемые решения, не опасаясь за возможность возникновения аварийной ситуации.

Будем считать, что возмущения (ошибки) в системе поступают к оператору в виде пуассоновского потока с интенсивностью λ . Вероятность того, что за время t в системе возникнет возмущение, в соответствии с принятым законом имеет вид [2]

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Каждому возмущению, возникающему в системе, соответствует определенное резервное время системы ($t_{рез}$). При этом, на выполнение указанной дополнительной функции оператор затрачивает время (t_0).

Тогда вероятность того, что за время t_0 успеет возникнуть возмущение и истечь резервное время $t_{рез}$, получится:

$$F(t_0 - t_{рез}) = 1 - e^{-\lambda(t_0 - t_{рез})} \quad (2)$$

Из литературных источников [2, 3, 4] известно, что в заданных условиях работы возмущения возникают в определенное время и с определенной интенсивностью. При этом вероятность появления возмущений, вследствие зависимости от большого числа факторов, подчинена нормальному закону. Вероятность появления различных $t_{рез}$, при этом будет распределена вокруг среднего значения резервного времени ($\bar{t}_{рез}$) со среднеквадратическим отклонением σ .

В этом случае вероятность появления i -го значения резервного времени составит [2]:

$$R(t_{рез\ i}) = \int_{t_{рез\ i}}^{t_{рез\ i+1}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{рез\ i} - \bar{t}_{рез})^2}{2\sigma^2}} dt_{рез} \quad (3)$$

Если случайные события появления возмущения за время t_0 и появления i -го значения резервного времени независимы, то вероятность отказа системы $q_i(t_0)$ из-за отвлечения оператора на время t_0 и поступления в этот период i -го возмущения определяется выражением:

$$q_i(t_0) = \left[1 - e^{-\lambda(t_0 - t_{рез i})} \right] \int_{t_{рез i}}^{t_{рез i+1}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{рез i} - \bar{t}_{рез})^2}{2\sigma^2}} dt_{рез} \quad (4)$$

Вероятность отказа системы $Q(t_0)$, обусловленная тем, что оператор отвлечется от управления на время t_0 , определяется выражением:

$$Q(t_0) = \sum_{i=1}^k \left[1 - e^{-\lambda(t_0 - t_{рез i})} \right] \int_{t_{рез i}}^{t_{рез i+1}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{рез i} - \bar{t}_{рез})^2}{2\sigma^2}} dt_{рез} \quad (5)$$

где k – число разрядов, на которые делятся возмущения и $t_{рез}$.

В соответствии с выражением (5) определяются значения вероятности возникновения отказа системы для различных периодов ухода оператора из управления t_0 . Приведенные выше соотношения позволяют решить задачу определения вероятности возникновения аварийной ситуации из-за того, что оператору (лоцману) необходимо некоторое время для восприятия и анализа информации, или вследствие отвлечения его для оценки обстановки на малой акватории и различных секторах швартовки. Значения предельно допустимых параметров перемещения судна предполагаются известными. Для решения поставленной задачи с помощью формулы (5) требуется выявить интенсивность появления возмущений, отклоняющих судно относительно заданного плана его перемещения, выявить величину этих возмущений и соответствующие этим возмущениям значения резервного времени. Эти величины и необходимые для расчета данные получены с помощью экспертных оценок на основе данных о предыдущих реальных швартовках крупнотоннажных судов.

Приведем программу расчета вероятности возникновения аварийной ситуации, выполненную в математическом редакторе MathCAD'2003 в зависимости от времени отвлечения или времени реакции оператора. Результат анализа приведен на рис. 1.

Программа анализа вероятности возникновения аварийной ситуации при швартовке крупнотоннажного судна к причалу

ORIGIN:= 1

```

Q1(t0) := [
k ← 61
v1 ← [
s ← 1
k1 ← 60
i ← 1
t ← 1
for i ∈ s, s + i..k1
[
m_t ← i
t ← t + 1
]
]
m^T
1
v1<61> ← v1<60>
t1 ← v1^T
λ ← 0.25
ts ← ∑_{i=1}^{k-1} t1_i / (k-1)
σ ← √(∑_{i=1}^{k-1} (t1_i - ts)^2 / (k-2))
for i ∈ 1..k-1
[
u_i ← [1 - e^{-λ·(1000-t1_i)}] · ∫_{t1_i}^{t1_{i+1}} (1 / (σ·√(2π))) · e^{-((t1_i-ts)^2 / (2σ^2))} dt
q_i ← [1 - e^{-λ·(t0-t1_i)}] · ∫_{t1_i}^{t1_{i+1}} (1 / (σ·√(2π))) · e^{-((t1_i-ts)^2 / (2σ^2))} dt if t1_i < t0
q_i ← 0 if t0 < t1_i
]
W5 ← ∑_{i=1}^{k-1} u_i
W ← (∑_{i=1}^{k-1} q_i) / W5
]

```

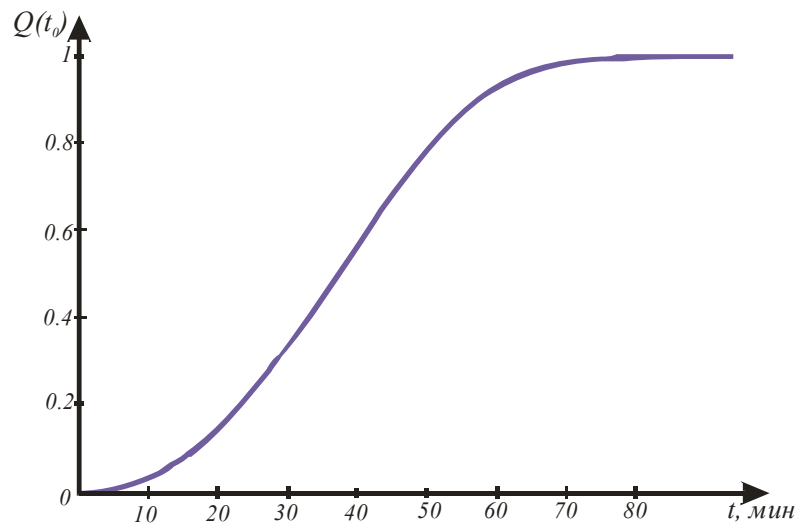


Рис. 1. Вероятность отказа системы $Q(t_0)$, обусловленная отвлечением оператора от управления на время t_0

На рис.1. представлена зависимость функции отказности $\Gamma_0(t_0)$ морской эрготехнической системы при швартовке крупнотоннажного судна от времени отвлечения t_0 от наблюдения за направлением опасности, расположенной вдоль вектора скорости на тот или иной участок границы опасности. Разработанная модель позволяет количественно предвидеть результат неверных действий человека или отвлечения его от непосредственного наблюдения за швартовкой. Результаты вычислений показывают, что отвлечение оператора даже на малые времена представляют опасность, если судно находится в ближней, относительно причала, зоне или опасном секторе. Оценка функции отказности $\Gamma_0(t_0)$ эрготехнической системы управления швартовкой от времени отвлечения t_0 и резервного времени $t_{рез}$ показывает, что большой вклад человеческого фактора в отказность рассматриваемой морской эрготехнической системы при швартовке на сильно стесненной акватории соответствует временам отвлечения t_0 порядка десятков секунд. Такая быстрота сканирования секторов опасности вокруг судна недоступна человеку. Поэтому для исключения аварийных случаев (навалов) необходимы технические средства, которые бы с повышенной скоростью реагировали на возмущение или препятствие на пути швартовки и практически мгновенно позволяли лоцману исправлять положение. Техническим вариантом такого решения может быть синтез точного измерителя дальности с

компьютером, который был запрограммирован на измерение всех параметров и выдавал бы мгновенную информацию лоцману в качестве совета. Кроме того, необходим переход к более эргономичным и компактным вспомогательным системам, которые могли бы использоваться совместно с микрокомпьютером и находиться в руках лоцмана, а также иметь программное обеспечение советующего типа, что особенно важно в наиболее опасной зоне швартовки, уже в 50-ти метрах от причала. С учетом вышесказанного возможно существенное повышение надежности всей эрготехнической системы в целом.

Таким образом, для исключения аварийных случаев (навалов) необходимы технические средства, которые бы с повышенной скоростью и высокой точностью сканировали бы темп сближения судна с границами опасности в процессе швартовки и практически мгновенно позволяли бы лоцману исправлять положение методами последнего маневра.

Литература

1. Котик М.А., Емельянов А.М. Природа ошибок человека-оператора. М.; Транспорт, 1993. – 209 с.
2. Котик М.А. Краткий курс инженерной психологии. Учебное пособие. Таллинн: Изд. “Валгус”, 1971. – 308 с.: ил.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – Учеб. Пособие для втузов. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк. 2000. – 383с.: ил.
4. Северцев Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и обработке. – М.: Высшая школа, 1989. – 432 с.

12. Обеспечение эксплуатационной надежности адаптирующейся системы радиолокационных датчиков ближнего действия для повышения безопасности мореплавания / Н.В. Старжинская, С.А. Лицкевич. Материалы седьмой региональной научно-технической конференции: Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Ч.2 – Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2008.

Морской флот в экономике страны занимает одно из первых мест по транспортировке грузов. В настоящее время экономические связи России существенно расширились, увеличилось количество морских перевозок, а, следовательно, и существенно возросла интенсивность движения судов. Практика показывает, что с увеличением интенсивности мореплавания наблюдается рост аварийности. Мореплавание вообще является сферой связанной с риском, с возможностью возникновения аварий и катастроф. Аварийные ситуации, связанные с движением крупнотоннажных судов, в частности судов перевозящих опасные грузы, приводят к катастрофическим последствиям не только на акватории портов, но и может стать бедствием для прилегающих жилых районов и наносить ущерб экономике страны. В связи с этим, важнейшей задачей совершенствования безопасности мореплавания является совершенствование систем обеспечения безопасности мореплавания на базе достижений современной науки, в частности системным применением радиоэлектронных средств, способных адаптироваться к сложной обстановке, складывающейся на ограниченной акватории.

Особый риск возникновения аварий возникает при движении судов в проливах и узкостях, где необходимо использовать дополнительные средства обеспечения безопасности. Учитывая большую массу судна и большую его инерционность, для получения точных данных в динамическом режиме о взаимном местоположении сближающихся судов, по нашему мнению, следует использовать, наряду с существующими средствами, адаптирующуюся систему радиолокационных датчиков ближнего действия [1], расположенных по борту судна и замыкающуюся на систему управления судна (рис.1).

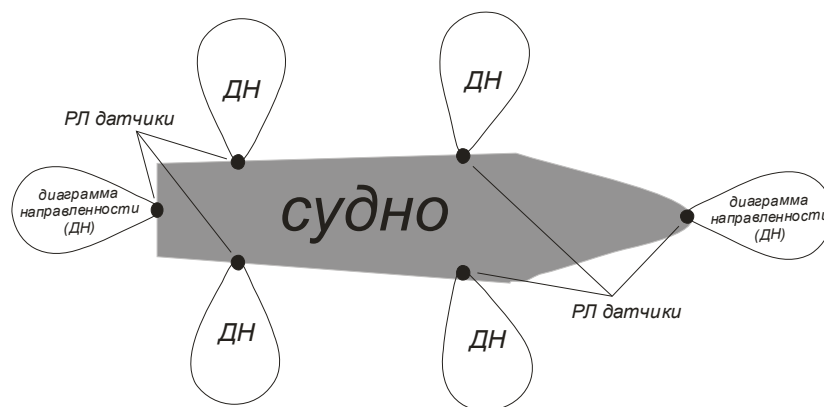


Рис.1. Схема расположения датчиков с диаграммами направленности

Такая система радиолокационных датчиков позволит обеспечить, во-первых, дополнительный контроль за движением судов (особенно при встречном движении) в акватории пролива и на выходе из него (дополняя РЛС СУДС). Во-вторых, позволит обеспечить информацией о возможном опасном сближении судов и выдать команду об опасности. Опасное сближение судов возникает между движущимися судами часто из-за неверных действий человека при маневрировании, расхождении и обгоне, завышенной скорости, несвоевременного чрезмерного сближения, просчетов при выборе безопасной дистанции, а также из-за неправильного использования РЭС или его отказа. Основной функцией системы адаптирующейся радиолокационных датчиков является слежение за сближением судов в условиях постоянно меняющейся обстановки, контроль границ критического сближения. При этом, если сближение судов становится критическим и оператором не предпринято никаких действий, системой отдается команда об остановке движения судна. Система включается автоматически при сближении судов.

Успех и эффективное функционирование такой системы может быть обеспечено лишь в том случае, если будет обеспечена ее высокая надежность. При этом вероятность работоспособного состояния такой системы должна на несколько порядков превышать вероятность возможной аварийной ситуации на море. Это может быть достигнуто большим запасом работоспособности аппаратуры, отказоустойчивостью, и обоснованным периодом ее обслуживания.

В морских условиях аппаратура подвергается значительным дестабилизирующим внешним воздействиям, которые порождают повреждения, со вре-

менем накапливаются, и снижают вероятность ее работоспособного состояния. Достигнув критического уровня, накопленные в результате эксплуатации повреждения приводят к отказу системы.

Одним из наиболее эффективных методов повышения эксплуатационной надежности является прогнозирование технического состояния системы и по результатам прогнозирования корректировка ее параметров и замена устройств, выработавших свой ресурс. Для обеспечения надежности системы радиолокационных датчиков ближнего действия воспользуемся методом прогнозирования обобщенным параметром.

Сущность этого метода заключается в том, что процесс, характеризуемый многими параметрами, описывается одномерной функцией, численные значения которой зависят от контролируемых параметров процесса. Такая функция рассматривается как обобщенный параметр процесса. Обобщенный параметр, таким образом, является математическим выражением, построенным из набора контролируемых параметров прогнозируемого объекта [2]. Примером такого рода объектов могут служить интегральные микросхемы, электромеханические устройства и другие сложные устройства. При обобщении параметров приходится решать следующие задачи:

- определение относительных значений первичных параметров;
- оценку значений первичных параметров для общей оценки состояния устройства;
- построение математической модели для обобщенного параметра.

Для реального применения метода необходимо выделить совокупность определяющих параметров X_1, X_2, \dots, X_M , и для каждого из них указать допустимые значения $X_1^*, X_2^*, \dots, X_M^*$, а также некоторые оптимальные значения этих параметров $X_{ОПТ}$ (как правило, $X_{ОПТ}$ является номинальным значением для X). Кроме того, необходимо ввести значения весовых коэффициентов, величины которых характеризуют важность соответствующих параметров для процесса изменения технического состояния объекта.

Определим с помощью приведенного метода, прогнозирование сроков

технического обслуживания радиолокационных датчиков контроля за сближением судов. Зададим время работы радиолокационного датчика в течение 3000 часов. В качестве определяющих, выберем следующие параметры РЛ датчика: мощность излучения $P_{из}$, длительность импульса τ_u , чувствительность радиоприемного устройства $P_{np(min)}$, период повторения импульсов, отношение сигнал/шум на входе приемника. Значения определяющих параметров X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 , а также их номинальные $X_{i ном}^*$, предельные значения X_i^* и весовые коэффициенты n_i приведены в таблице 1. Весовые коэффициенты определялись из соотношения значимости контролируемых параметров для прогнозирования долговечности.

Таблица 1

$t, \text{ час}$	$X_{1 ном}^* = 500 \text{ Bm}$ $X_1^* = 400 \text{ Bm}$ $n_i = 0.25$	$X_{i ном}^* = 10^{-12} \text{ Bm}$ $X_i^* = 1.1 \cdot 10^{-12}$ $n_i = 0.15$	$X_{i ном}^* = 0.01 \cdot 10^{-6} \text{ c}$ $X_i^* = 0.02 \cdot 10^{-6} \text{ c}$ $n_i = 0.1$	$X_{i ном}^* = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ $X_i^* = 0.3 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ $n_i = 0.1$	$X_{i ном}^* = 7 \text{ дБ}$ $X_i^* = 3 \text{ дБ}$ $n_i = 0.1$
0	500	10^{-12}	$0.01 \cdot 10^{-6}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	7
500	490	10^{-12}	$0.011 \cdot 10^{-6}$	$0.47 \cdot 10^{-3}$	7
1000	470	$1.04 \cdot 10^{-12}$	$0.012 \cdot 10^{-6}$	$0.4 \cdot 10^{-3}$	6
2000	450	$1.05 \cdot 10^{-12}$	$0.015 \cdot 10^{-6}$	$0.39 \cdot 10^{-3}$	5
3000	420	$1.06 \cdot 10^{-12}$	$0.017 \cdot 10^{-6}$	$0.32 \cdot 10^{-3}$	5

Решение поставленной задачи проведем с помощью математического редактора *MathCAD*. Программа прогнозирования времени отказа радиолокационных датчиков методом обобщенного параметра приведена ниже.

Прогнозирование времени отказа радиолокационных средств методом обобщенного параметра:

ORIGIN:= 1

Значения определяющих параметров устройства в течение 1000 часов (для $t=0; 500; 1000; 2000; 3000$ часов):

$$M := \begin{pmatrix} 500 & 10^{-12} & 0.01 \cdot 10^{-6} & 0.5 \cdot 10^{-3} & 7 \\ 490 & 10^{-12} & 0.011 \cdot 10^{-6} & 0.47 \cdot 10^{-3} & 7 \\ 470 & 1.04 \cdot 10^{-12} & 0.012 \cdot 10^{-6} & 0.4 \cdot 10^{-3} & 6 \\ 450 & 1.05 \cdot 10^{-12} & 0.015 \cdot 10^{-6} & 0.39 \cdot 10^{-3} & 5 \\ 420 & 1.06 \cdot 10^{-12} & 0.017 \cdot 10^{-6} & 0.32 \cdot 10^{-3} & 5 \end{pmatrix}$$

Предельные значения определяющих параметров устройства:

$$X1 := (400 \ 1.1 \cdot 10^{-12} \ 0.5 \cdot 10^{-6} \ 0.3 \cdot 10^{-3} \ 3)$$

Оптимальные значения определяющих параметров устройства:

$$X2 := (500 \ 10^{-12} \ 0.01 \cdot 10^{-6} \ 0.5 \cdot 10^{-3} \ 7)$$

$$k := \text{cols}(M) \quad m := \text{rows}(M)$$

$$i := 1..m \quad j := 1..k$$

Находим безразмерный параметр:

$$X_{i,j} := \frac{M_{i,j} - X1_{1,j}}{X2_{1,j} - X1_{1,j}}$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.9 & 1 & 0.998 & 0.85 & 1 \\ 0.7 & 0.6 & 0.996 & 0.5 & 0.75 \\ 0.5 & 0.5 & 0.99 & 0.45 & 0.5 \\ 0.2 & 0.4 & 0.986 & 0.1 & 0.5 \end{pmatrix}$$

Теперь найдем обобщенный параметр устройства:

Значения весовых коэффициентов: $n := \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.2 \\ 0.14 \\ 0.11 \\ 0.25 \end{pmatrix}$

Задаем найденные ранее безразмерные параметры:

$$X1 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad X2 := \begin{pmatrix} 0.9 \\ 1 \\ 0.998 \\ 0.85 \\ 1 \end{pmatrix} \quad X3 := \begin{pmatrix} 0.7 \\ 0.6 \\ 0.996 \\ 0.5 \\ 0.75 \end{pmatrix} \quad X4 := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.99 \\ 0.45 \\ 0.5 \end{pmatrix} \quad X5 := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.4 \\ 0.986 \\ 0.1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Находим теперь обобщенный параметр устройства для $t = 0, 500; 1000; 2000; 3000$ часов:

$$Q1 := \left[\sum_{j=1}^5 [n_j \cdot (X1_j)^2] \right] \quad Q2 := \left[\sum_{j=1}^5 [n_j \cdot (X2_j)^2] \right] \quad Q3 := \left[\sum_{j=1}^5 [n_j \cdot (X3_j)^2] \right]$$

$$Q1 = 1$$

$$Q2 = 0.912$$

$$Q3 = 0.526$$

$$Q4 := \left[\sum_{j=1}^5 [n_j \cdot (X4_j)^2] \right] \quad Q5 := \left[\sum_{j=1}^5 [n_j \cdot (X5_j)^2] \right]$$

$$Q4 = 0.347$$

$$Q5 = 0.244$$

Решение задачи прогнозирования с помощью линейной функции

$$r(t) := b_1 + b_2 \cdot t$$

Вводим полученные выше данные:

$$\text{data} := \begin{pmatrix} 0 & 1 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \\ 500 & 0.912 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \\ 1000 & 0.526 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \\ 2000 & 0.347 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \\ 3000 & 0.244 + \text{rnorm}(1, 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-5})_1 \end{pmatrix}$$

$$X := \text{data} \langle 1 \rangle \quad Y := \text{data} \langle 2 \rangle$$

$$n := \text{rows}(\text{data}) \quad n = 5$$

$$b_1 := \text{intercept}(X, Y) \quad b_1 = 0.949$$

$$b_2 := \text{slope}(X, Y) \quad b_2 = -2.637 \times 10^{-4}$$

$$r(t) := b_1 + b_2 \cdot t$$

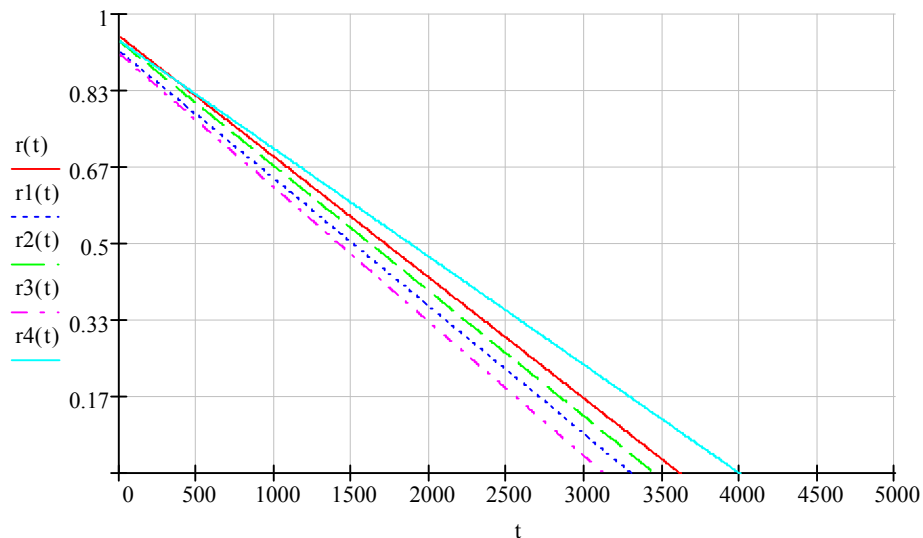


Рис.1 – Степень спада прогнозирующей функции и время достижения критического (минимального) значения прогнозирующей функции (для пяти реализаций).

Таким образом, приведенная выше программа позволяет определить запас работоспособности аппаратуры и проследить ее изменение во времени. На основе полученной информации, определим теперь периодичность технического обслуживания радиоэлектронных средств.

При нахождении распределения наработки до отказа $f(t)$ по характеристикам процесса разрегулирования используют случайную функцию вида

$$X(t) = X_0 + b \cdot t, \quad (1)$$

где X_0 – начальное значение параметра $X(t)$, которое также может быть случайной величиной и подчиняться некоторому закону распределения;

b – скорость изменения параметра X ;

t – время наблюдения за параметром.

При этом плотность распределения наработки до отказа определяется *альфа-распределением* [2,3]

$$f(t) = \frac{c\beta}{t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{t} - \alpha \right)^2 \right]. \quad (2)$$

где β – относительный запас долговечности;

α – относительная скорость изменения параметра.

Значения α и β определим, пользуясь полученными ранее данными обобщенного параметра, с помощью редактора MathCAD.

```

ORIGIN:= 1
n := 5
Q := (1 0.912 0.526 0.347 0.244)T
f :=  $\frac{1}{n} \cdot \sum Q$     f = 0.606
σu :=  $\left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..n \\ u_i \leftarrow (Q_i - f)^2 \\ \sigma u \leftarrow \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum u} \end{array} \right.$ 
m :=  $\frac{|f - 1|}{3000}$     σb :=  $\frac{\sigma u}{3000}$ 
α :=  $\frac{|m|}{\sigma b}$     β :=  $\frac{|0 - 1|}{\sigma b}$ 
α = 1.171    β = 8.911 × 103

```

Теперь с учетом найденных значений параметров α и β определим периодичность технического обслуживания с помощью математического редактора MathCAD.

Относительная скорость изменения определяющего параметра $\alpha := 1.171$

Относительная долговечность $\beta := 8.911 \times 10^3$

Функция плотности распределения наработки до отказа

$$f(t) := \frac{\beta}{t^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{\beta}{t} - \alpha \right)^2 \right]$$

Вероятность безотказной работы устройства

$$P(t) := 1 - \int_0^t f(t) dt$$
$$P(t) \text{ float, 5} \rightarrow .50000 - .50000 \operatorname{erf} \left[7.0711 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(-8.911010^6 + 1171 \cdot \tau)}{\tau^1} \right]$$
$$P(t) := 0.5 - 0.5 \operatorname{erf} \left[3.5 \cdot \frac{(-1000 + \tau)}{\tau} \right]$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(\tau) := \frac{\frac{\beta}{\tau^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{\beta}{\tau} - \alpha \right)^2 \right]}{0.5 - 0.5 \operatorname{erf} \left[3.5 \cdot \frac{(-1000 + \tau)}{\tau} \right]}$$

Затраты, связанные с отказами и последующим восстановлением $c_1 := 2000$

Затраты на плановое техническое обслуживание $c_2 := 7000$

Начальное значение времени $\tau := 1000$

$$T := \operatorname{root} \left[\lambda(\tau) \cdot \int_0^{\tau} \left[0.5 - 0.5 \operatorname{erf} \left[3.5 \cdot \frac{(-1000 + t)}{t} \right] \right] dt - \left[0.5 - 0.5 \operatorname{erf} \left[3.5 \cdot \frac{(-1000 + \tau)}{\tau} \right] \right] - \frac{c_2}{c_1 - c_2}, \tau \right]$$

Оптимальная периодичность обслуживания

$$T = 1.985 \times 10^3 \text{ час}$$

Таким образом, результаты расчета показывают, что оптимальный период профилактического обслуживания системы составляет порядка $T=2,7$ месяца, для чего планируются соответствующие восстановительные работы. Кроме этого, в связи с тем, что рассматриваемое измерительное устройство подвержено большому количеству внешних факторов (осадки, ветер и т.п.), кроме периодического технического обслуживания необходимо проводить регламентные работы и осуществлять наблюдение за устройством.

Литература

1. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. Под ред. Я.С. Ицхоки. М. «Сов. радио», 1976, 456с.
2. Острейковский В.А. Теория надежности: Учеб. для ВУЗов/ В.А. Острейковский – М.: Высш. шк., 2003 – 463с.: ил.
3. Лицкевич А.П., Демьянов В.В., Бойко А.И., Карбовец Н.В. Системная надежность морского радиоэлектронного оборудования, РИО МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск, 2005 г., 184с.

13. Роль резерва времени на принятие решения судоводителем при прохождении узкостей и проливов / Н.В. Старжинская, Д.С. Авдонькин. Сборник научных трудов. Выпуск 13. – Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2009.

В последние годы наблюдается рост экономической активности в Южном Российском регионе, который ведет к значительному увеличению потока судов из Черного моря в Азовское. Кроме того, события ноября 2007 года, произошедшие в Керченском проливе, показывают, что с точки зрения безопасного судоходства район достаточно проблематичен. Эти факторы в совокупности нестабильными гидрометеорологическими условиями, а также с учетом наличия большого числа мелей и мелководья свидетельствует о необходимости обеспечения надежного и безопасного плавания через Керченский пролив, а, следовательно, что чрезвычайно важно, и безопасности человеческих жизней, порта, окружающей среды.

С целью повышения надежности плавания необходимо в первую очередь совершенствовать те звенья системы, где наблюдаются наибольшие отклонения от нормальных условий функционирования. На судне таким звеном является человек-оператор (судоводитель). Из числа ошибок, допускаемых в процессе управляющих действий, наиболее частыми являются ошибки оператора, возникающие в процессе переработки большого количества информации, ошибки оценки ситуации и принятия решения [1]. Это в свою очередь вызывает ситуацию, при которой ошибки, возникшие на одних этапах восприятия и переработки информации, порождают в дальнейшем дополнительные ошибки, которые сказываются на оценке ситуации в целом, на принятии решения и его реализации.

Для обеспечения безаварийного плавания судна судоводителю необходимо постоянно контролировать его движение. Непрерывность и высокая точность счисления с прокладкой пути судна на путевой навигационной карте являются неременными требованиями к судоводителю при осуществлении им судовождения в стесненных условиях плавания. Способы определения места судна в открытом море, требующие выбора ориентиров, подготовки к наблю-

дениям, производства замеров, записей, обработки результатов, прокладки на карте, часто не могут быть применимы при плавании в узкостях. Это связано с тем, что для их реализации требуется больше времени, чем имеется при прохождении узкостей. Поэтому судоводителю, ведущему судно в узкости, необходимо более часто и точно определять место судна. Навигационная прокладка пути судна на путевой навигационной карте должна вестись настолько быстро, чтобы обеспечить своевременность осуществления очередного маневра. Такое ограничение во времени влечет за собой возможность возникновения неквалифицированных, несвоевременных или неточных действий судоводителя.

Неквалифицированное обращение с навигационной аппаратурой, а также несвоевременные действия или ошибки, допускаемые оператором-судоводителем, осуществляющим управление судном, ведут к затратам времени и сокращению времени, необходимого для принятия решения и его реализации. Это следует расценивать как невыполнение поставленной перед ним задачи, то есть, как отказ звена «человек» и всей системы в целом. Так, например, если оператор, осуществляющий управляющие действия вовремя не отреагирует на аварийный сигнал, то создается аварийная ситуация.

Все вышесказанное ставит задачу изучения временных характеристик деятельности человека-оператора для оптимального распределения времени оператором при прохождении узкости, а также в качестве главного момента обеспечения необходимого резерва времени на принятие правильного решения.

Для этой цели сформулируем задачу определения вероятности возникновения аварийной ситуации при управлении судном в результате неквалифицированных или несвоевременных действий человека-оператора, обусловленных недостаточным количеством времени, необходимым для ее устранения. В процессе управления судном при проводке его по фарватеру или узкостям, оператор-судоводитель может допускать ошибки в управлении, ведущие к возникновению аварийной ситуации. При этом для устранения возникших ошибок оператору, как было сказано выше, требуется дополнительное время, в течение которого он может не опасаться за возможность развития аварийной ситуации.

Обозначим время, которое оператор использует для оценки окружающей обстановки и информации от навигационных приборов, величиной t_0 . Понятие времени t_0 включает также время отвлечения оператора-судоводителя на непредвиденные обстоятельства, время задержки реакции судоводителя, время, затрачиваемое на коррекцию неточных действий и т.п. Дополнительное время, которым располагает оператор для устранения ошибки и предотвращения аварийной ситуации – величиной $t_{рез}$. Дополнительное время, которое назовем резервным временем, очень важно для обеспечения безопасности мореплавания.

Резервным временем системы $t_{рез}$, находящейся под воздействием данного возмущения, назовем избыток времени (над минимально необходимым), которым располагает оператор для предотвращения отклонений ее параметров за допустимые пределы и приведения их в заданное состояние [1, 2]. В течение этого времени оператор может принимать решения и вносить (в случае необходимости) исправления в принимаемые решения, не опасаясь за возможность возникновения аварийной ситуации.

Будем считать, что возмущения (ошибки) в системе поступают к оператору в виде пуассоновского потока с интенсивностью λ . Вероятность того, что за время t в системе возникнет возмущение, в соответствии с принятым законом имеет вид [2]

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Каждому возмущению, возникающему в системе, соответствует определенное резервное время системы ($t_{рез}$). При этом, на выполнение указанной дополнительной функции оператор затрачивает время (t_0).

Тогда вероятность того, что за время t_0 успеет возникнуть возмущение и истечь резервное время $t_{рез}$, будет определяться выражением:

$$F(t_0 - t_{рез}) = 1 - e^{-\lambda(t_0 - t_{рез})} \quad (2)$$

Из литературных источников [2, 3, 4] известно, что в заданных условиях работы возмущения возникают в определенное время и с определенной интенсивностью. При этом вероятность появления возмущений, вследствие зависимо-

сти от большого числа факторов, подчинена нормальному закону. Вероятность появления различных t_{pez} , при этом будет распределена вокруг среднего значения резервного времени (\bar{t}_{pez}) со среднеквадратическим отклонением σ .

В этом случае вероятность появления i -го значения резервного времени составит [2]:

$$R(t_{pez\ i}) = \int_{t_{pez\ i}}^{t_{pez\ i+1}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{pez\ i} - \bar{t}_{pez})^2}{2\sigma^2}} dt_{pez} \quad (3)$$

Если случайные события появления возмущения за время t_0 и появления i -го значения резервного времени независимы, то вероятность отказа системы $q_i(t_0)$ из-за отвлечения оператора на время t_0 и поступления в этот период i -го возмущения определяется выражением:

$$q_i(t_0) = \left[1 - e^{-\lambda(t_0 - t_{pez\ i})} \right] \int_{t_{pez\ i}}^{t_{pez\ i+1}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{pez\ i} - \bar{t}_{pez})^2}{2\sigma^2}} dt_{pez} \quad (4)$$

Вероятность отказа системы $Q(t_0)$, обусловленная тем, что оператор отвлечется от управления на время t_0 , определяется выражением:

$$Q(t_0) = \sum_{i=1}^k \left[1 - e^{-\lambda(t_0 - t_{pez\ i})} \right] \int_{t_{pez\ i}}^{t_{pez\ i+1}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{pez\ i} - \bar{t}_{pez})^2}{2\sigma^2}} dt_{pez} \quad (5)$$

где k – число разрядов, на которые делятся возмущения и t_{pez} .

В соответствии с выражением (5) определяются значения вероятности возникновения отказа системы для различных периодов ухода оператора из управления t_0 . Приведенные выше соотношения позволяют решить задачу определения вероятности возникновения аварийной ситуации из-за того, что оператору-судоводителю необходимо некоторое время для восприятия и анализа информации, или вследствие отвлечения его для оценки обстановки на малой акватории и ли при движении по фарватеру. Значения предельно допустимых параметров перемещения судна предполагаются известными. Для решения поставленной задачи с помощью формулы (5) требуется определить интенсивность появления возмущений, отклоняющих судно относительно заданного плана его перемещения,

выявить величину этих возмущений и соответствующие этим возмущениям значения резервного времени. Необходимые для расчета данные получены с помощью экспертных оценок на основе данных о предыдущих реальных проводках крупнотоннажных судов.

Программа расчета вероятности отклонения от нормы, вносимого оператором-судоводителем, составлена в математическом редакторе MathCAD в зависимости от времени отвлечения или времени реакции оператора. Результат анализа приведен на рис. 1.

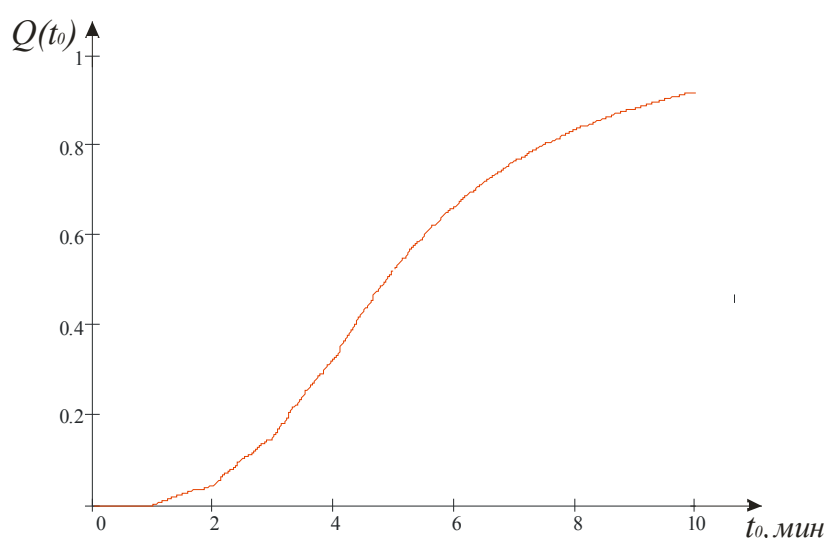


Рис. 1. Вероятность отклонения от нормы, вносимого оператором-судоводителем $Q(t_0)$, обусловленная отвлечением оператора от управления на время t_0

На рис.1. представлена зависимость вероятности отклонения от нормы, вносимого оператором-судоводителем, $Q(t_0)$ от времени отвлечения оператора-судоводителя от управления на время t_0 . Разработанная модель позволяет количественно предвидеть результат несвоевременных, неквалифицированных действий человека или отвлечения его от непосредственного наблюдения за движением судна. Результаты вычислений показывают, что отвлечение оператора даже на малые времена представляют опасность, если судно движется на ограниченной территории (например, в узкости) или находится вблизи других судов или сооружений. Оценка отказа $Q(t_0)$ системы управления судном от времени

отвлечения t_0 и резервного времени $t_{рез}$ показывает, что большой вклад человеческого фактора в отказность рассматриваемой морской системы при движении судна в стесненной акватории соответствует временам отвлечения t_0 порядка десятков секунд.

Таким образом, анализ вероятности отклонения от нормы показывает необходимость, в любом случае, иметь резерв времени, который достигается, как квалификацией оператора, так и наличием специальных интеллектуальных советующих средств.

Литература

5. Котик М.А., Емельянов А.М. Природа ошибок человека-оператора. М.; Транспорт, 1993. – 209 с.
6. Котик М.А. Краткий курс инженерной психологии. Учебное пособие. Таллинн: Изд. “Валгус”, 1971. – 308 с.: ил.
7. Карбовец Н.В. Надежность морской телекоммуникационной эрготехнической системы управления швартовкой крупнотоннажных судов (на примере новороссийского порта), диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новороссийск, 2006 – 130.
8. Северцев Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и обработке. – М.: Высшая школа, 1989. – 432 с.

14. Многопараметрическое распознавание технического состояния сложных береговых систем / Н.В. Старжинская, С.А. Лицкевич. Материалы восьмой региональной научно-технической конференции: Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Ч.2 – Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2010.

Надежность и безопасность захода судна в порт в значительной степени обеспечивается широким применением береговых радиоэлектронных средств технического контроля. Эффективное функционирование таких систем может быть обеспечено лишь в случае их высокой надежности. Поэтому обеспечение надежности радиоэлектронных средств технического контроля – важнейшая эксплуатационная задача. При этом вероятность работоспособного состояния такой системы должна на несколько порядков превышать вероятность возможной аварийной ситуации на море. Это может быть достигнуто большим запасом работоспособности аппаратуры, отказоустойчивостью, и обоснованным периодом ее обслуживания.

В морских условиях эксплуатации аппаратура подвергается значительным дестабилизирующим внешним воздействиям, которые порождают повреждения, накапливаются со временем, и снижают вероятность ее работоспособного состояния. Достигнув критического уровня, накопленные в результате эксплуатации повреждения приводят к отказу системы.

В качестве одного из методов повышения эксплуатационной надежности в данной работе предлагается использовать диагностику технического состояния системы с помощью математической модели многопараметрического распознавания образов. Затем на основании полученных результатов можно проводить корректировку параметров системы и замену устройств, выработавших свой ресурс.

Сущность этого метода заключается в следующем. Распознавание образов – это отнесение исходных данных к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные из общей массы несущественных данных [1]. Т.е необходимо определить порог, за которым

складывается определенная комбинация показателей функционирования технической системы, определяющая общий неблагоприятный результат, который и будет критическим состоянием системы. Под критическим состоянием будем понимать такое состояние системы, когда необходимо производить техническое обслуживание системы или ее замену.

Особенностью решаемой задачи является то, что при множестве различных показателей, отражающих результаты функционирования технической системы, существует всего две альтернативы при принятии решения:

- отказ;
- работоспособное состояние.

Распознавание образа – это отнесение объекта к тому или иному классу S_1 или S_2 . задача распознавания образов включает три этапа [1]:

- формирование признакового пространства;
- обучение распознающей системы – создание обобщенных классов отказавших S_2 и нормально функционирующих S_1 систем для снятия неопределенности с помощью обучающих наблюдений;
- принятие решений – отнесение системы к классу отказавших S_2 или к классу нормально функционирующих S_1 .

Проведем теперь диагностику критического состояния исследуемой радиоэлектронной системы в сопоставлении с надежно функционирующими (S_1) системами $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_3^{(1)}, X_4^{(1)}$ и системами $X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, X_3^{(2)}, X_4^{(2)}, X_5^{(2)}$, в которых произошел отказ (S_2).

В таблице 1 приведены параметры радиолокационных станций, которые могут использоваться в системах управления движением судов для оценки [2].

Для диагностики критического состояния исследуемой системы возьмем следующие показатели:

- рабочая частота;
- мощность излучения;
- скорость вращения антенны;
- минимальная чувствительность;

- длительность зондирующих импульсов;
- частота следования радиоимпульсов;
- коэффициент усиления антенны;
- ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости;
- ширина диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости.

Таблица 1

Параметры	РЛС «Рейтеон»	РЛС «Герма»
Рабочая частота, ГГц	9,41	9,41
Мощность излучения, кВт	50	25
Скорость вращения антенны, об/мин	20	20
минимальная чувствительность, дБ	-110	-110
длительность зондирующих импульсов, мкс	0,06 (3600) мс 0,5 (1800) 1,0 (900)	0,05 (300– 4400) мс 0,25 (600– 3300)
частота следования радиоимпульсов, Гц	3600 (0,25; 0,5; 0,75; 1,5) 1800 (3; 6; 12) 900 (24; 48; 64)	800–4400 ($\tau_{И}=0,05\mu\text{с}$) 600–3300 ($\tau_{И}=0,25\mu\text{с}$)
коэффициент усиления антенны	36 дБ	36 дБ
ширина диаграммы направленности антенны:		
в горизонтальной плоскости, град	0,43	0,4
в вертикальной плоскости, град	19	20

Далее составляем таблицу с данными о надежно функционирующих системах и системах, в которых произошел отказ. Характеристики надежно функционирующих радиоэлектронных систем $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_3^{(1)}, X_4^{(1)}$, систем $X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, X_3^{(2)}, X_4^{(2)}, X_5^{(2)}$, в которых произошел отказ и исследуемой системы приведены в таблице 2.

Таблица 2

Признаки	S_1 (надежно функционирующие системы)										S_2 (системы, в которых произошел отказ)										Иссле- дуемая система \bar{X}
	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$X_3^{(1)}$	$X_4^{(1)}$	$X_5^{(1)}$	$X_6^{(1)}$	$X_7^{(1)}$	$X_8^{(1)}$	$X_9^{(1)}$	$X_{10}^{(1)}$	$X_1^{(2)}$	$X_2^{(2)}$	$X_3^{(2)}$	$X_4^{(2)}$	$X_5^{(2)}$	$X_6^{(2)}$	$X_7^{(2)}$	$X_8^{(2)}$	$X_9^{(2)}$	$X_{10}^{(2)}$	
Рабочая частота, ГГц	9.4	9.41	9.5	9.41	9.4	9.6	9.55	9.474	9.556	9.328	8.183	7.388	9.014	12.464	9.952	10.95	11.629	9.361	10.246	9.896	9.4
Мощность излучения, кВт	25	25.5	24.6	24.618	24	26.5	25.1	25	24.947	24.4	15.765	37.584	30.101	24.618	22.752	26.538	16.723	28.73	24.947	20.823	25
Скорость вращения антенны, об/мин	20.1	20.3	20.4	20.5	20.32	20.41	20.12	20.25	20.7	20.6	22.696	21.093	22.025	14.22	14.474	14.483	17.964	13.434	5.798	26.381	21
минимальная чувствительность, дБ	-110	-111	-112	-113	-110.7	-114	-112.7	-113.5	-112.5	-114	-81	-83	-79	-85	-78	-89	-82	-87	-84	-85.7	-110
длительность зондирующих импульсов, мкс	0.25	0.264	0.27	0.25	0.245	0.252	0.25	0.28	0.25	0.269	0.139	1.167	0.072	0.107	0.206	0.252	0.185	0.327	0.361	0.502	0.3
частота следования радиоимпульсов, Гц	600	1800	800	3300	750	3200	2500	650	620	2400	2035	1141	283	1507	557.5	3245	2181	2266	1657	5155	2100
коэффициент усиления антенны	36	35	36	34	37	36	36	35	35	36	31.414	28.829	36.941	30.609	36.462	35.752	41.62	42.927	28.928	31.66	38
ширина ДН в горизонтальной плоскости	0.4	0.39	0.42	0.38	0.41	0.4	0.39	0.387	0.42	0.4	0.437	0.304	0.424	0.361	0.379	0.405	0.325	0.387	0.379	0.441	0.32
ширина ДН в вертикальной плоскости	20	21	20.8	20.7	20.6	20	20.1	20.4	19.99	20.5	24.071	16.507	20.859	22.992	20.639	25.939	25.645	15.229	19.995	22.876	22

Программа диагностики технического состояния радиоэлектронной системы составлена с помощью математического редактора MathCAD.

Программа диагностики технического состояния сложных береговых систем (статистическое распознавание состояний систем)

ORIGIN:= 1

Данные о надежном функционировании системы - X1

$$X1 := \begin{pmatrix} 9.4 & 9.41 & 9.5 & 9.41 & 9.4 & 9.6 & 9.55 & 9.474 & 9.556 & 9.328 \\ 25 & 25.5 & 24.6 & 24.618 & 24 & 26.5 & 25.1 & 25 & 24.947 & 24.4 \\ 20.1 & 20.3 & 20.4 & 20.5 & 20.32 & 20.41 & 20.12 & 20.25 & 20.7 & 20.6 \\ -110 & -111 & -112 & -113 & -110.7 & -114 & -112.7 & -113.5 & -112.5 & -114 \\ 0.25 & 0.264 & 0.27 & 0.25 & 0.245 & 0.252 & 0.25 & 0.28 & 0.25 & 0.269 \\ 600 & 1800 & 800 & 3300 & 750 & 3200 & 2500 & 650 & 620 & 2400 \\ 36 & 35 & 36 & 34 & 37 & 36 & 36 & 35 & 35 & 36 \\ 0.4 & 0.39 & 0.42 & 0.38 & 0.41 & 0.4 & 0.39 & 0.387 & 0.42 & 0.4 \\ 20 & 21 & 20.8 & 20.7 & 20.6 & 20 & 20.1 & 20.4 & 19.99 & 20.5 \end{pmatrix}$$

Данные о системах в которых произошел отказ - X2

$$X2 := \begin{pmatrix} 8.183 & 7.388 & 9.014 & 12.464 & 9.952 & 10.95 & 11.629 & 9.361 & 10.246 & 9.896 \\ 15.765 & 37.584 & 30.101 & 24.618 & 22.752 & 26.538 & 16.723 & 28.73 & 24.947 & 20.823 \\ 22.696 & 21.093 & 22.025 & 14.22 & 14.474 & 14.483 & 17.964 & 13.434 & 5.798 & 26.381 \\ -81 & -83 & -79 & -85 & -78 & -89 & -82 & -87 & -84 & -85.7 \\ 0.139 & 0.167 & 0.072 & 0.107 & 0.206 & 0.252 & 0.185 & 0.327 & 0.361 & 0.502 \\ 2035 & 1141 & 283 & 1507 & 557.5 & 3245 & 2181 & 2266 & 1657 & 5155 \\ 31.414 & 28.829 & 36.941 & 30.609 & 36.462 & 35.752 & 41.62 & 42.927 & 28.928 & 31.66 \\ 0.437 & 0.304 & 0.424 & 0.361 & 0.379 & 0.405 & 0.325 & 0.387 & 0.379 & 0.441 \\ 24.071 & 16.507 & 20.859 & 22.992 & 20.639 & 25.939 & 25.645 & 15.229 & 19.995 & 22.876 \end{pmatrix}$$

Данные о текущем состоянии анализируемой системы - X

$$X := (9.4 \ 25 \ 21 \ -110 \ 0.3 \ 2100 \ 38 \ 0.32 \ 22)^T$$

Параметр идентифицирующий принадлежность исследуемой системы - L

Вероятность достоверности принадлежности системы - D

```

R := | n ← 1
      | for i ∈ 1..rows(X1)
      |   a1i ←  $\frac{1}{\text{cols}(X1)} \cdot \sum_{j=1}^{\text{cols}(X1)} X1_{i,j}$ 
      |   for i ∈ 1..rows(X2)
      |     a2i ←  $\frac{1}{\text{cols}(X2)} \cdot \sum_{j=1}^{\text{cols}(X2)} X2_{i,j}$ 
      |     for i ∈ 1..rows(X1)
      |       for j ∈ 1..cols(X1)
      |         h1i,j ← X1i,j - a1i
      |     M1 ←  $\frac{1}{\text{cols}(X1)} \cdot h1 \cdot h1^T$ 
      |     for i ∈ 1..rows(X2)
      |       for j ∈ 1..cols(X2)
      |         h2i,j ← X2i,j - a2i
      |     M2 ←  $\frac{1}{\text{cols}(X2)} \cdot h2 \cdot h2^T$ 
      |     M ←  $\frac{\text{cols}(X1)}{\text{cols}(X1) + \text{cols}(X2) - 2} \cdot M1 + \frac{\text{cols}(X2)}{\text{cols}(X1) + \text{cols}(X2) - 2} \cdot M2$ 
      |     L ←  $\frac{n}{2} \cdot (a1 - a2)^T \cdot M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ n \end{bmatrix} \cdot X - (a1 + a2)$ 
      |     d ←  $\sqrt{(a1 - a2)^T \cdot M^{-1} \cdot (a1 - a2)}$ 
      |     σ1 ←  $\sqrt{\frac{1}{\text{cols}(X1)} + \frac{1}{\text{cols}(X2)}}$ 
      |     σ2 ←  $\sqrt{\frac{1}{\text{cols}(X1)} + \frac{1}{\text{cols}(X2)} + \frac{4}{n}}$ 
      |     S1 ←  $\text{pnorm}\left(\frac{d}{\sigma1}, 0, 1\right) \cdot \text{pnorm}\left(\frac{-d}{\sigma2}, 0, 1\right) + \text{pnorm}\left(\frac{-d}{\sigma1}, 0, 1\right) \cdot \text{pnorm}\left(\frac{d}{\sigma2}, 0, 1\right)$ 
      |     S2 ←  $\left[ \sigma1 \cdot \exp\left(\frac{-d^2}{2 \cdot \sigma2^2}\right) \cdot \left( \text{pnorm}\left(\frac{d}{\sigma1}, 0, 1\right) - \text{pnorm}\left(\frac{-d}{\sigma1}, 0, 1\right) \right) \right]$ 
      |     S3 ←  $\left[ \frac{\sigma1 \cdot \sigma2}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot d \cdot (\sigma1^2 - \sigma2^2)} \cdot \left( \sigma2 \cdot \exp\left(\frac{-d^2}{2 \cdot \sigma1^2}\right) \cdot \text{pnorm}\left(\frac{d}{\sigma2}, 0, 1\right) - \text{pnorm}\left(\frac{-d}{\sigma2}, 0, 1\right) - S2 \right) \right]$ 
      |     D ← 1 - (S1 + S3)
      |     N ← (L D)

```

R = [(154.88817) (1)]

Полученные выше результаты ($L = 154,8881 > 0$) показывают, что исследуемая система является надежно функционирующей и далека от критического (отказного) состояния. При этом найденное решение справедливо с достоверностью $D = 1$.

Таким образом, рассмотренную выше математическую модель многопараметрического распознавания образов можно использовать для диагностики технического состояния технических систем для определения сроков проведения технического обслуживания, проведения корректировки вышедших за допустимые пределы параметров, а также предотвращения отказов.

Литература

1. Фомин Я.А. Диагностика кризисного состояния предприятия: Учеб. пособие для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 349 с.
2. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. Под ред. Я.С. Ицхоки. М. «Сов. радио», 1976, 456с.
3. Лицкевич А.П., Демьянов В.В., Бойко А.И., Карбовец Н.В. Системная надежность морского радиоэлектронного оборудования, РИО МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск, 2005 г., 184с.

15. Системная надежность морского радиоэлектронного оборудования / А.П. Лицкевич, Бойко А.И., Н.В. Карбовец, В.В. Демьянов. Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова. 2008.

В книге изложены основные понятия прикладной теории надежности – понятия внезапного и постепенного отказов, границы применимости наиболее распространенных на практике законов распределения времени наработки до отказа. Рассмотрены решения прикладных задач надежности методом вероятностного моделирования и некоторые методы прогнозирования технического состояния морского радиоэлектронного оборудования с применением современных средств компьютерной математики (математического редактора MathCAD'2003). Приведен подробный анализ надежности сложной восстанавливаемой морской информационной системы связи. Предлагаемая книга может быть полезна инженерам и служить учебным пособием для студентов, изучающих основы теории надежности.

**16. Прикладные вопросы надежности информационных систем/
Н.В. Старжинская. Новороссийск. РИО МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова.
2010.**

В учебном пособии изложены основные разделы теории надежности. Пособие рассчитано на изучение аппаратных отказов и отказов программного обеспечения информационных систем, причин их возникновения, а также методов расчета аппаратной надежности информационных систем и надежности программного обеспечения.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности «Информационные системы и технологии», но может быть полезно при изучении теории надежности на других технических специальностях.